

DLR-IB-FT-BS-2016-135

**LuFo IV
SiRaSKoF-H DLR
Schlussbericht**

Interner Bericht

Autor: Mario Müllhäuser



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

LuFo IV SiRaSKoF-H DLR Schlussbericht

ZE:	Förderkennzeichen:
DLR, Institut für Flugsystemtechnik	20H1108B
Vorhabenbezeichnung: Ermittlung des Spektrums der taktilen Flugassistenzfunktionen für Hubschrauber und Implementierung eines haptischen Vokabulars	
Laufzeit des Vorhabens (verlängert): 01.01.2012 - 31.12.2015	
Berichtszeitraum: 01.01.2012 - 31.12.2015	

Autor(en): Mario Müllhäuser

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft
Institut für Flugsystemtechnik
Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages


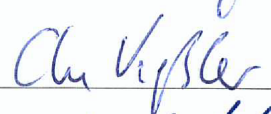
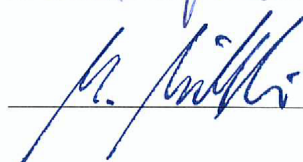
Braunschweig, 23.06.2016

Unterschriften:

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Levedag

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. Christoph Keßler

Projektleiter: Dipl.-Ing. Mario Müllhäuser

Leerseite.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
I. Kurzdarstellung	7
I.1. Aufgabenstellung	9
I.2. Voraussetzungen	9
I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	11
I.4. Wissenschaftlich/Technischer Stand	13
I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	16
II. Eingehende Darstellung	19
II.1. Erzielte Ergebnisse	21
AP 2.1. Tactile Cueing	21
AP 2.2. Sidestick Hardware Degradierungsaspekte	39
AP 2.3. Dual Pilot Cockpit mit gekoppelten aktiven Sidesticks (elektronische Stange)	48
II.2. Erläuterung des zahlenmäßigen Nachweises	55
II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	55
II.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	55
II.5. Relevante Ergebnisse Dritter	56
II.6. Veröffentlichungen und Dokumentation	59
II.6.1. Eigene Veröffentlichungen	59
II.6.2. Studentische Arbeiten	59
II.6.3. Erstellte Dokumente	60

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einh.	Bedeutung
ACT/FHS		Active Control Technology / Flying Helicopter Simulator Fliegender Hubschrauber Simulator auf Basis einer EC 135
AHS		American Helicopter Society
AP		Arbeitspaket
AVES		Air Vehicle Simulator, Flugsimulationszentrum des DLR
BAAINBw		Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr, ehemals BWB
BMWi		Bundesministerium für Wirtschaft- und Energie
BWB		ehemals Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, heute BAAINBw
CLS		Control Loading System, engl. für Steuerkraftsystem, für aktive Steuerorgane, etwa aktive Sidesticks
DLR		Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz Gemeinschaft
EC 135		Hubschraubermuster von AHD, bildet die Basis des ACT/FHS
ECD		Eurocopter Deutschland GmbH, jetzt Airbus Helicopters Deutschland GmbH, Projektpartner und Verbundführer im Projekt SiRaSKoF-H
Einh.		Einheit
engl.		englisch
ETPS		Empire Test Pilots' School
FCS		Flight Control System, Flugregler
FLI		First-Limit-Indicator, Triebwerkskombinationsanzeige, Standardinstrument in modernen Eurocopter Hubschraubern und damit auch im ACT/FHS des DLR
HACT		Helicopter Active Control Technology, Prototyp eines Assistenzsystems von Boeing, ursprünglich für den Hubschrauber Comanche vorgesehen
HOTAS		Haptic Obstacle and Terrain Avoidance System
IB		Institutsbericht/Interner Bericht
IFES		Integrated Failure Evaluation Scheme
LuFo		Deutsches Luftfahrtforschungsprogramm des BMWi
NASA-TLX		NASA Task-Load-Index, Fragebogen zur Selbsteinschätzung der Arbeitsbelastung
ONERA		<i>Office national d'études et de recherches aérospatiales</i> , Die französische Luft- und Raumfahrt- Forschungseinrichtung als Pendant zum DLR
SCM		Servo Control Module, Steuerungsrechner des WA&S CLS
SiRaSKoF-H		Sichere Rechner-Architektur für aktive Steuerorgane und Konzepte für einen optimierten Flugbetrieb mit Hubschraubern - das diesem Bericht zugrundeliegende LuFo-IV Forschungsverbundvorhaben
TOP		Takeoff Power, der Bereich zwischen MCP und MTP
WA&S		Wittenstein aerospace & simulation, Hersteller der im Projekt beschafften aktiven Sidesticks

MCP	[%]	<i>Maximum Continuous Power</i> , Maximale Dauer-Triebwerksleistung
MTP	[%]	<i>Maximum Takeoff Power</i> , Maximale Start-Triebwerksleistung
2PASD		Dual-Pilot-Active-Sidestick-Demonstrator
v_y	[kts]	Geschwindigkeit des besten Steigens



Teil I.

Kurzdarstellung



I.1. Aufgabenstellung

Das Projekt SiRaSKoF-H ist ein Verbundprojekt des Verbundführers Airbus Helicopters Deutschland GmbH (AHD), ehemals Eurocopter Deutschland GmbH (ECD), und des Verbundpartners Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Es wird im vierten Luftfahrtforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Der Projektbeitrag des Verbundführers AHD beschäftigt sich mit der Entwicklung einer sicheren Rechnerarchitektur für aktive Sidesticks (Arbeitspaket 1). Das Ziel des DLR Partnerbeitrags liegt darin zugehörige „Konzepten für einen optimierten Flugbetrieb mit Hubschraubern“ für aktive Sidesticks zu untersuchen (Arbeitspaket 2). Ursprünglich war dazu geplant, einen von AHD zu erstellenden Prototypen eines aktiven Sidesticks unter fliegerischen Gesichtspunkten zu untersuchen und dazu Funktionen zu entwickeln. Der Titel des DLR Partnerbeitrags lautet daher: „Ermittlung des Spektrums der taktilen Flugassistentenfunktionen für Hubschrauber und Implementierung eines haptischen Vokabulars“.

Das DLR beschäftigt sich unter anderem mit der Entwicklung und Evaluation von Pilotenassistenzsystemen für Hubschrauber. Dabei kommt der Fliegende Hubschrauber Simulator (ACT/FHS) zum Einsatz. Dieser verfügt über eine weltweit einzigartige Infrastruktur und Ausrüstung zur Entwicklung von Pilotenassistenzfunktionen, die das Ziel haben, die Pilotenbelastung zu reduzieren und die Sicherheit zu erhöhen, sowie die Einsatzfähigkeit bei Tag und Nacht und jedem Wetter zu gewährleisten. Dabei werden bereits jetzt aktive Sidesticks als Steuerorgane eingesetzt. Aktive Sidesticks zeichnen sich dadurch aus, dass die Kräfte, die der Pilot wahrnimmt, durch Motoren, meist Elektromotoren, erzeugt werden. Sie dienen als notwendiges Werkzeug zur Realisierung einer gezielten haptischen Rückkopplung zur Übermittlung intuitiv verständlicher Signale an den Piloten und tragen damit entscheidend und nachweislich zur Verbesserung des Situationsbewusstseins des Piloten und damit der Flugsicherheit bei. Nachfolgend werden die einzelnen Arbeitspakete, bzw. Aufgabenbereiche des DLR genannt:

- AP 2.1 Tactile Cueing: Zunächst wird das Spektrum taktiler Assistenzfunktionen für den Hubschrauberflug und dessen Nutzen ermittelt. Ausgewählte Funktionen werden entwickelt und gemeinsam mit den bereits vorliegenden Funktionen flugerprobt. Zur Erhöhung der Intuitivität der taktilen Assistenz wird ein haptisches Vokabular entwickelt, damit der Pilot diverse Funktionen unterscheiden kann.
- AP 2.2 Hardware Degradierungsaspekte: Es soll untersucht werden, ob Degradierungen des aktiven Sidesticks in definierte Backup-Betriebsarten innerhalb eines geregelten Hubschraubers sicher beherrschbar sind. Daraus lassen sich Anforderungen an die Zuverlässigkeit aktiver Steuerorgane ableiten, die einen direkten Einfluss auf die Systemkosten haben.
- AP 2.3 Dual Pilot Cockpit mit gekoppelten aktiven Sidesticks: Es werden Strategien für elektronisch gekoppelte aktive Sidesticks im Zwei-Personen-Cockpit untersucht. Dazu wird ein Dual-Pilot-Active-Sidestick-Demonstrator (2PASD) mit gekoppelten aktiven Sidesticks aufgebaut.

I.2. Voraussetzungen

Eine endgültige Bewertung der Anforderungen an ein aktives Steuerorgan und dessen Nutzen kann letztendlich nur in realitätsnahen Umgebungsbedingungen erfolgen. Hierzu ist das DLR besonders günstig positioniert. Das DLR betreibt Grundlagen- und angewandte Forschung auf dem Gebiet der Pilotenassistenz, Reglerauslegung und Implementierung in fliegende Versuchsplattformen und den daraus resultierenden Untersuchungen. Die Kompetenz reicht in diesem Bereich über 30 Jahre zurück. Bereits in den neunziger Jahren wurde in Zusammenarbeit mit dem DLR ein von AHD entwickeltes aktives zyklisches Steuerorgan in einen Hubschrauber des Typs BO105 integriert. Zur Bewertung der Flugeigenschaften wurden Flugversuche durchgeführt [1]. Der ACT/FHS wird seit 2002 beim DLR für die Entwicklung von Regelungs- und Assistenzkonzepten genutzt [2]. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts ACT-TILT wurde der optimale Einsatz von aktiven Steuerorganen für Tilt-Rotoren untersucht. Hierbei wurden unter anderen ergonomische Fragen, wie der Einfluss taktiler Rückmeldung auf die Flugeigenschaften und Probleme beim Zweipilotenbetrieb betrachtet. Die Ergebnisse sind in [3] zusammengefasst.

Seit 2004 betreibt das DLR den Fly-by-Light-Versuchsträger „Fliegender Helikopter Simulator“ (ACT/FHS). Dies ist ein Forschungshubschrauber auf der Basis einer EC135. Dieser wurde stark modifiziert und enthält eine moderne fly-by-light Steuerung, samt Sicherheitskonzept und Experimentalsystem. Dies ermöglicht die sichere Erprobung von experimenteller Hard- und Software im Flug. Das DLR hält neben dem ACT/FHS die gesamte Werkzeugkette zur Entwicklung und Erforschung von Piloten-Assistenzsystemen. Zur Vorbereitung von Flugversuchen auf dem ACT/FHS standen zu Anfang der Projektlaufzeit noch die ACT/FHS-Bodensimulation zur Verfügung. Diese wurde später durch das EC135-Cockpit im neuen Air-Vehicle-Simulator Simulatorzentrum (AVES) mit Festsitz- und Bewegungssimulator abgelöst.

Der ACT/FHS und der Simulator wurden 2006 mit einem rechtshändigen aktiven Sidestick und 2009 mit einem linkshändigen aktiven Sidestick ausgerüstet. Die Einrüstungen wurden jeweils zu gleichen Teilen durch einen Auftrag vom damaligen Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB), heute Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw) und durch DLR Eigenmittel finanziert. Die aktiven Sidesticks wurden bereits im Flug getestet. Im DLR Projekt ALLFlight wurden aktive Sidesticks als elementarer Bestandteil der Mensch-Maschine-Schnittstelle im komplementären drei Säulen-Konzept bestehend aus Flugregelung, Sichtsysteme und Haptik eingesetzt. Dabei wurde bereits eine haptische Torque-Protection entwickelt und mit dem ACT/FHS demonstriert, die in SiRaSKoF-H weiterentwickelt wurde [4]. Ebenfalls im Rahmen von ALLFlight wurde der ACT/FHS mit optischen Sensoren zur Hindernisdetektion ausgerüstet und eine Software zur Sensordatenfusion entwickelt, die auch im Flugsimulator verwendet werden kann.

Im LuFo Projekt HC_FBX wurden unter anderem so genannten Upper-Modes für eine Hubschrauberregelung entwickelt, welche die Hubschraubersteuerung vereinfachen [5]. Die Upper-Modes werden bei der Funktionenentwicklung und Evaluation in SiRaSKoF-H verwendet.

Speziell für die Auslegung und Erforschung von Funktionen wurde ein kompakter Sidestick-Labor-Demonstrator entwickelt. Die fliegerische Erprobung setzt die Verfügbarkeit des Forschungshub-

schraubers ACT/FHS voraus. In Bezug auf SiRaSKoF-H bedeutet dies, dass die fliegerische „[Evaluation Torque-Protection / Haptic-FLI](#)“ stattfinden konnte (S. 31), jedoch wegen dringender Wartungsarbeiten zur Projektlaufzeit nicht mehr die „[Haptische Hindernisvermeidung \(Haptic-Obstacle-Avoidance\)](#)“ (S. 25) fliegerisch evaluiert werden konnte.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeitspakete werden im Abschnitt [II.1 Erzielte Ergebnisse](#) detailliert erläutert. Der ursprüngliche Zeitplan/Balkenplan ist in Abbildung [I.3.1](#) dargestellt. In der PDF-Version kann bei hoher Auflösung in den Plan hineingezoomt werden.

Während der Laufzeit hat es die folgenden Ereignisse gegeben

- Das Kickoff war am 23.02.2012 beim Verbundführer AHD in Ottobrunn.
- Am 06.12.2012 erfolgte das Midterm-Review. Bei diesem Treffen wurde der Status im DLR-Partneranteil vorgestellt. Das Midterm-Review war notwendige Bedingung für die Freigabe der Material-Mittel zur Beschaffung des Dual-Pilot-Active-Sidestick-Demonstrators (2PASD). Auf dem Midterm-Review wurde kommuniziert, dass der aktive Sidestick von AHD nicht für den Aufbau von 2PASD zur Verfügung stehen würde und die aktiven Sidesticks stattdessen von einem dritten Anbieter eingekauft werden sollten. Der Antrag zur Freigabe der Mittel erfolgte schriftlich im Nachgang des Midterm-Reviews.
- Die Freigabe der Mittel erfolgte am 02.03.2013 vorbehaltlich der Vorlage von Angeboten.
- Die Ausschreibung des „Steuerkraftsystem aus zwei Paaren gekoppelter, aktiver Sidesticks“ gemäß überarbeiteter Spezifikation [\[53\]](#) wurde am 03.05.2013 auf www.bund.de unter der Kennziffer 678447 veröffentlicht. Es gab zwei Bieter. Die Firma Wittenstein aerospace & simulation GmbH hat den Zuschlag bekommen.
- Die Bestellung des „Steuerkraftsystem aus zwei Paaren gekoppelter, aktiver Sidesticks“ wurde im Dezember 2014 ausgelöst. Die Lieferung der aktiven Sidesticks erfolgte am 18.07.2014.
- Am 20.05.2015 erfolgte ein Antrag auf kostenneutrale Verlängerung bis 31.12.2015.
- Am 20.01.2016 fand das Schlussreview bei AHD in Donauwörth unter Anwesenheit eines Vertreters des Projektträgers statt. Dabei haben alle Partner und Unterauftragnehmer ihre Arbeiten und erreichten Ergebnisse in Vortragsform vorgestellt.

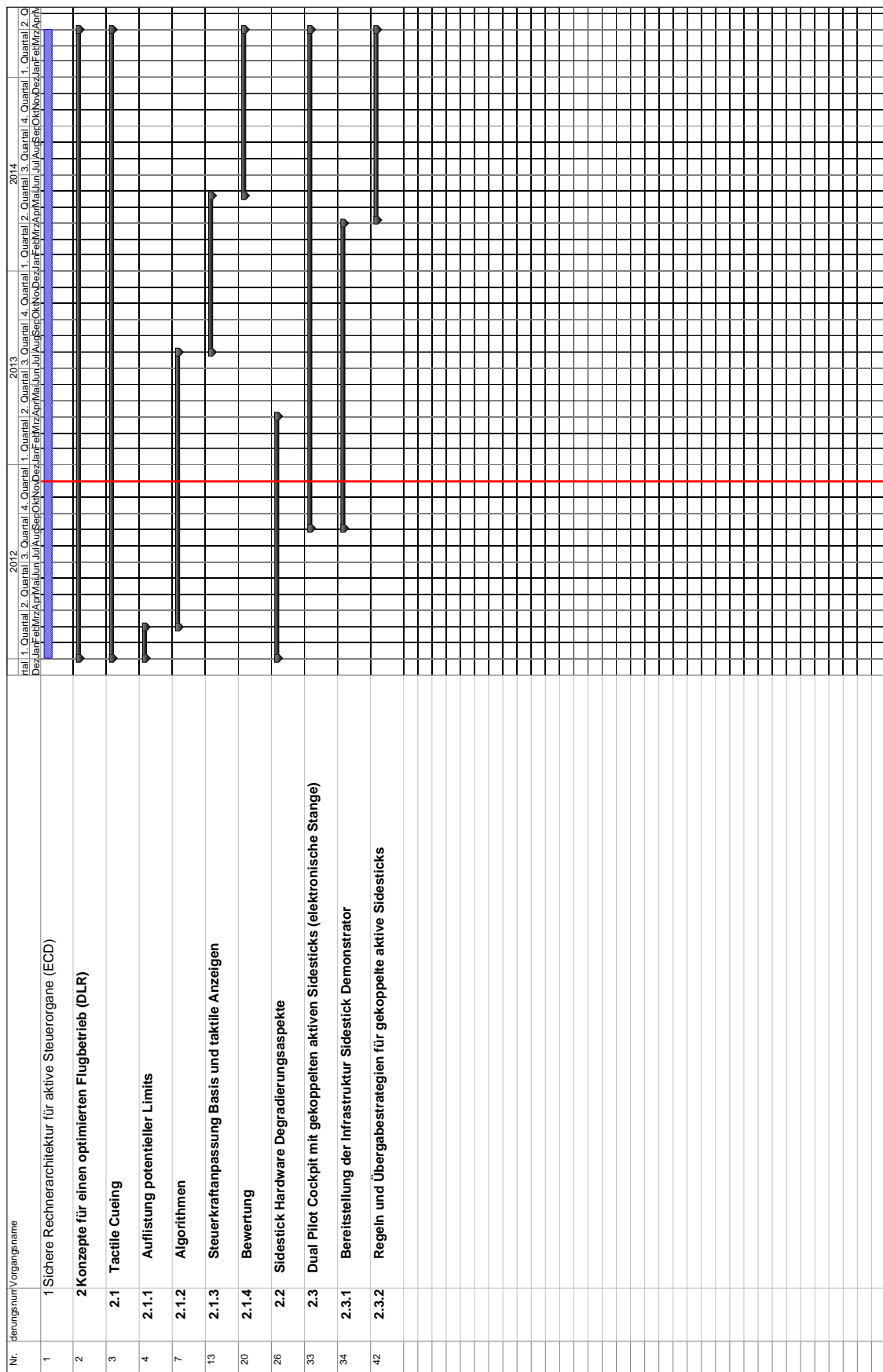


Abbildung I.3.1.: Ursprünglicher Zeitplan

I.4. Wissenschaftlich/Technischer Stand

Passive Steuerorgane sind in der Luftfahrt heute fest etabliert. Alle Airbus Flugzeugtypen sind mit einem passiven fly-by-wire Sidestick ausgerüstet. In den letzten Jahren gab es in Nord-Amerika intensive Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet aktiver Steuerorgane. Hierbei wurden insbesondere Steuerorgane für Hubschrauber betrachtet. Speziell im HACT (Helicopter Active Control Technology) Programm der Firmen Boeing und Bell und der US Army wurde die taktile Informationsübertragung durch aktive Steuerorgane mit modernen Flugregelungsalgorithmen für Hubschrauber abgestimmt. Dabei konnte man eine erhebliche Verbesserung des Flugverhaltens, der Flugsicherheit und der Arbeitsbelastung des Piloten erzielen [6; 7; 8; 9]. Weitere Quellen Belegen die intensive Beschäftigung mit taktile Assistenz zur Anzeige von Betriebsgrenzen auch an anderen Forschungseinrichtungen in den USA [10; 11; 12]. Die jüngsten Quellen stammen aus dem Jahr 2011 und beschäftigen sich mit den Auswirkungen von Variationen in der Steuerkraftcharakteristik aktiver Steuerorgane auf die Flugeigenschaften [13] und mit dem Einsatz eines aktiven Kollektivsteuers zur Autorotationsuntersützung [14]. Auch aufgrund dieser Arbeiten haben aktive Steuerorgane im militärischen Bereich Anwendung gefunden. Der Kampfflugzeugtrainer T-50 der Korea Aerospace Industries verfügt über einen aktiven Sidestick, der in Zusammenarbeit von BAE Systems und Wittenstein entwickelt wurde. In den USA sind aktive Steuerorgane im Joint Strike Fighter integriert. Im Rahmen eines Produktverbesserungsprogramms wird für den Hubschrauber UH60-M der US Army die konventionelle, mechanische Steuerung durch ein Fly-by-X System mit aktiven Steuerorganen ersetzt. Dieses wurde 2008 auf Basis des Erprobungsträgers RASCAL JUH60-A (Abbildung 1, links) erprobt [15]. Bei der Entwicklung des CH53-K (Abbildung 1, rechts) sind ebenfalls aktive Steuerorgane vorgesehen.

Im zivilen Bereich gibt es heute kein zugelassenes aktives Steuerorgan. Die Herausforderung liegt dabei in den hohen Anforderungen bezüglich Sicherheit und Funktionalität und den damit verbundenen hohen Kosten. Nach der Einrüstung von aktiven Sidesticks in den ACT/FHS konnte die Wirksamkeit einfacher haptischer Demonstrationsfunktionen im Flug nachgewiesen werden [16; 17; 4]. Jedoch gab es noch keine systematische Untersuchung priorisierter Funktionen in Bezug auf ihren Gesamtnutzen bezüglich Erhöhung der Sicherheit und Kosteneinsparpotential.

Die taktile Qualität der bisher von AHD und DLR untersuchten am Markt erhältlichen aktiven Sidesticks reichte nicht aus, um die taktilen Anforderungen von oben her einzugrenzen: Daher wird ein Gerät benötigt, welches von den Kunden, bzw. Testpiloten mindestens als befriedigend bezüglich seiner taktilen Güte, bzw. Bandbreite bewertet wird, um die Mindestanforderungen quantifizieren zu können. Im LuFo Projekt ARISTO-KAT wurde daher bei AHD, damals ECD, der elektromechanische Geräteanteil (Mechanik, Sensorik, Aktuatorik) als Grundlage für einen zivil zulassbaren Sidestick hoher taktiler Güte entwickelt [18]. Das DLR war als Unterauftragnehmer an der Erstellung der Spezifikation beteiligt. SiRaSKoF-H setzte diese Kooperation fort. Die im DLR-Partneranteil durchgeführten Entwicklungen und Untersuchungen zur Sidestick-Nutzung fließen in die Spezifikation eines flugtauglichen aktiven Sidesticks ein.

Verwendete Fachliteratur

- [1] Knorr, R. ; Melz, C. ; Faulkner, A. ; Obermayer, M.: The Application of Active Side Arm Controllers in Helicopters. In: *Piloting Vertical Flight Aircraft: A Conference on Flying Qualities and Human Factors*. San Francisco (USA), 1993
- [2] Kaletka, Jürgen ; Kurscheid, Hermann ; Butter, Ulrich: FHS - the New Research Helicopter Ready for Service. In: *29th European Rotorcraft Forum*. Friedrichshafen, 2003, S. 35/1 – 35/12
- [3] Burgmair, Raphael ; Alford, Adrian ; Mouritsen, Stephen: Definition and Verification of Active Inceptor Requirements for a Future Tiltrotor. In: *31th European Rotorcraft Forum*. Florence (Italy), 2005
- [4] Lantzsich, Robin ; Greiser, Steffen ; Wolfram, Jens ; Wartmann, Johannes ; Müllhäuser, Mario ; Lücken, Thomas ; Döhler, Hans-Ullrich ; Peinecke, Niklas: ALLFlight: a Full Scale Pilot Assistance Test Environment. In: *American Helicopter Society 68th Annual Forum*. Fort Worth (TX), 2012
- [5] Bickel, Norbert ; Klaubert, Jens: *Generische Fly-by-X Flugsteuerung für Hubschrauber: HC_FBX ; Schlussbericht ; Berichtszeitraum: 01.01.2009 bis 30.09.2012*. Donauwörth und Hannover, 2013
- [6] Einthoven, Pieter G. ; Miller, David G. ; Nicholas, Jeffrey S. ; Margetich, Stephen J.: Tactile Cueing Experiments with a Three Axis Sidestick. In: *American Helicopter Society 57th Annual Forum*. Washington (DC), 2001
- [7] Einthoven, Pieter G. ; Miller, David G.: The HACT Vertical Controller. In: *American Helicopter Society 58th Annual Forum*. Montreal (Canada), 2002
- [8] Einthoven, Pieter G.: Active Controller Performance Requirements. In: *American Helicopter Society 60th Annual Forum*. Baltimore (MD), 2004
- [9] Miller, David G. ; Einthoven, Pieter G. ; Morse, Channing S. ; Wood, John: HACT Flight Control System (HFCS) Control Law Overview. In: *American Helicopter Society 58th Annual Forum*. Montreal (Canada), 2002
- [10] Sahani, Niles A. ; Horn, Joseph F.: Collective Axis Cueing and Limit Avoidance Algorithms for Carefree Maneuvering. In: *American Helicopter Society Flight Controls and Crew System Design Specialists' Meeting*. Philadelphia (PA), 2002
- [11] Whalley, Matthew S. ; Hindson, William S. ; Thiers, George G.: A Comparison of Active Sidestick and Conventional Inceptors for Helicopter Flight Envelope Tactile Cueing. In: *American Helicopter Society 56th Annual Forum*. Virginia Beach (VA), 2000
- [12] Horn, Joe ; Calise, Anthony ; Prasad, J.V.R.: Development of Envelope Protection Systems for Rotorcraft. In: *American Helicopter Society 55th Annual Forum*. Montreal (Canada), 1999
- [13] Greenfield, Aaron ; Sahasrabudhe, Vineet: Side-Stick Force-Feel Parameter Study of a Cargo-Class Helicopter. In: *American Helicopter Society 67th Annual Forum*. Virginia Beach (VA), 2011
- [14] Keller, Jeffrey D. ; McKillip, Robert M. ; Horn, Joseph F.: Active Flight Control and Appliqué Inceptor Concepts for Autorotation Performance Enhancement. In: *American Helicopter Society 67th Annual Forum*. Virginia Beach (VA), 2011
- [15] Fletcher, Jay W. ; Lusardi, Jeff ; Mansur, Mohammadreza H. ; Arteburn, David R. ; Cherepinsky, Igor ; Driscoll, Joe ; Morse, Channing S. ; Kalinowski, Kevin F.: UH-60M Upgrade Fly-By-Wire Flight Control Risk Reduction using the RASCAL JUH-60A In-Flight Simulator. In: *American*

- Helicopter Society 64th Annual Forum*. Montreal (Canada), 2008
- [16] Abildgaard, Max ; Binet, Laurent: Active Sidesticks used for Vortex Ring State Avoidance. In: *35th European Rotorcraft Forum*. Hamburg (Germany), 2009
- [17] Grünhagen, Wolfgang v. ; Müllhäuser, Mario ; Abildgaard, Max ; Lantzs, Robin: Active Inceptors in FHS for Pilot Assistance Systems. In: *36th European Rotorcraft Forum*. Paris (France), 2010
- [18] Klaubert, Jens P. ; Bickel, Norbert: *Ausrüstungs-Industrie System Offensive - Katalysator für umweltrelevante und Effizienz steigernde Systembausteine, Teilvorhaben ECD: Aktive Steuerorgane: Schlussbericht ARISTO-KAT ; Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2009 bis 31.03.2013*. Donauwörth und Hannover, 2013
- [19] Whalley, Matthew S. ; Achache, Marc: Joint U.S./France Investigation of Helicopter Flight Envelope Limit Cueing. In: *American Helicopter Society 52nd Annual Forum*. Washington (DC), 1996
- [20] United States Army Aviation and Missile Command Aviation Engineering Directorate: ADS-33E-PRF: Aeronautical Design Standard, Performance Specification, Handling Qualities Requirements for Military Aircraft. Redstone Arsenal (AL), 2000
- [21] Casali, John G. ; Wierwille, Walter W.: A Comparison of Rating Scale, Secondary Task, Physiological, and Primary-Task Workload Estimation Techniques in a Simulated Flight Task Emphasizing Communications Load. In: *Human Factors* 25 (1983), Nr. 6, S. 623–641
- [22] Rehmann, Albert J.: *Handbook of Human Performance Measures and Crew Requirements for Flightdeck Research / FAA*. 1995 (DOT/FAA/CT-TN95/49)
- [23] Greiser, Steffen ; Lantzs, Robin ; Wolfram, Jens ; Wartmann, Johannes ; Müllhäuser, Mario ; Lüken, Thomas ; Döhler, Hans-Ullrich ; Peinecke, Niklas: Results of the pilot assistance system "Assisted Low-Level Flight and Landing on Unprepared Landing Sites" obtained with the ACT/FHS research rotorcraft. In: *Aerospace Science and Technology* 45 (2015), S. 215–227
- [24] Lam, Thanh M.: *Haptic Interface for UAV Teleoperation*. Delft, Diss., 2009
- [25] Schönenberg, Thorben: *Flugeigenschaftskriterien zur Hubschraubersteuerung mit aktiven Sidesticks*. Braunschweig (Germany), Technische Universität Braunschweig, Diss., 2012
- [26] Taylor, Adam ; Greenfield, Aaron ; Sahasrabudhe, Vineet: The Development of Active Inceptor Systems and the Scope and Design Issues of Tactile Cueing Systems. In: *American Helicopter Society 64th Annual Forum*. Montreal (Canada), 2008
- [27] Hindson, William S. ; Schroeder, Jeffery A. ; Eshow, Michelle M.: A Pilot Rating Scale for Evaluating Failure Transients in Electronic Flight Control Systems: AIAA-90-2827-CP. In: AIAA (Hrsg.): *Proceedings of the Atmospheric Flight Mechanics Conference*. Portland (OR), 1990, S. 777–787
- [28] Weakly, Jerry M. ; Kleinhesselink, Kristi M. ; Mason, David H. ; Mitchell, David G.: Simulation Evaluation of V-22 Degraded-Mode Flying Qualities. In: *American Helicopter Society 59th Annual Forum*. Phoenix (AZ), 2003
- [29] Padfield, Gareth D.: *Helicopter Flight Dynamics: The Theory and Application of Flying Qualities and Simulation Modeling*. 2nd. Oxford (GB) und Reston (VA) : Blackwell Publishing Ltd. and AIAA Inc., 2007. – ISBN 978–1–56347–920–5
- [30] Grünhagen, Wolfgang v. ; Schönenberg, Thorben ; Lantzs, Robin ; Lusardi, Jeff ; Lee, David ; Fischer, Heiko: Handling Qualities Studies into the Interaction between Active Sidestick

- Parameters and Helicopter Response Types. In: *38th European Rotorcraft Forum*. Amsterdam, 2012
- [31] Schieben, Anna ; Heesen, Matthias ; Schindler, Julian ; Kelsch, Johann ; Flemisch, Frank: The theater-system technique: Agile designing and testing of system behavior and interaction, applied to highly automated vehicles. In: *Proceedings of AutomotiveUI'09*, 2009
- [32] Enns, Russel ; Dryfoos, James ; Lukes, George ; Hayes, Pam ; Kashawlic, Bryan: Adaptive Vehicle Management Systems Phase I Overview. In: *American Helicopter Society 69th Annual Forum*. Phoenix (AZ), 2013
- [33] SAE International: *Aerospace Active Inceptor Systems for Aircraft Flight and Engine Controls*. 2013/02
- [34] Grünhagen, Wolfgang v. ; Müllhäuser, Mario ; Höfinger, Marc ; Lusardi, Jeff: In-Flight Evaluation of Active Sidestick Parameters With Respect to Handling Qualities For Rate Command and Attitude Command Response Types. In: *American Helicopter Society Handling Quality Specialists Meeting 2014*. Huntsville (AL), 2014
- [35] Sung K. Kim ; Bothwell, Mike ; Fortenbaugh, R.L: The Bell 525 Relentless, The World's First "Next Generation" Fly-by-Wire Commercial Helicopter. In: *American Helicopter Society 70th Annual Forum*. Montréal und Québec (Canada), 2014
- [36] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: *Förderung von Forschungs- und Technologievorhaben im Rahmen des nationalen zivilen Luftfahrtforschungsprogramms Vierter Programmaufruf 2012-2015*. Berlin, 2011
- [37] European Helicopter Safety Team (EHST) ; European Aviation Safety Agency (EASA) (Hrsg.): *Final Report - EHST Analysis of 2000-2005 European Helicopter Accidents*: ISBN 92-9210-095-7. Köln and Germany, 2010

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Projekts fand eine regelmäßige Abstimmung der Arbeiten und Ergebnisse mit dem Verbundführer AHD statt. Die am DLR entwickelten Algorithmen für die [Torque-Protection \(Haptic-FLI\)](#) wurde an den Verbundführer AHD geschickt. Dort werden sie in die Entwicklungsumgebung zur Ansteuerung der in diesem Projekt bei AHD entwickelten aktiven Sidesticks genutzt. Die Torque-Protection wurde bereits an AHD transferiert und dort integriert und ermöglichen damit Technologiedemonstration der erstellten Hardware mit einer realen Applikation. Vertreter von AHD waren bei einer Simulatorstudie für die Erprobung der [Torque-Protection \(Haptic-FLI\)](#) und der Funktion [Haptische Hindernisvermeidung \(Haptic-Obstacle-Avoidance\)](#) und der Bewertung verschiedener Entwürfe für die [Evaluation Haptisches Vokabular](#) vor Ort.

Die genannte Studie wurde durch die Teilnahme von drei Piloten der Bundespolizei, die insbesondere über Erfahrungen im Rettungsdienst mit der EC135 verfügen, unkompliziert unterstützt. So konnten wertvolle Hinweise aus der Gruppe der potentiellen Nutzer dieser Funktionen gewonnen werden.

Mit der französischen Luft- und Raumfahrt Forschungseinrichtung ONERA hat es einen Austausch im Bereich Tactile Cueing zur Hindernisvermeidung gegeben (Haptic-Obstacle-Avoidance). Dieser

Erfahrungsaustausch fand unter dem Arbeitstitel HOTAS (Haptic Obstacle and Terrain Avoidance System) statt. Dabei ging es um die Definition von relevanten Manövern und Evaluierungsszenarien, sowie den Erfahrungsaustausch zu den verwendeten Algorithmen. HOTAS fügt sich damit in idealer Weise in die Arbeiten von AP 2.1 *Tactile Cueing: Auswahl, Entwicklung und Evaluation taktiler Assistenzsysteme* ein. Die von beiden Seiten entwickelten Funktionen und die Ergebnisse der Evaluationen werden in einem gemeinsamen Konferenzbeitrag auf dem European Rotorcraft Forum 2016 vorgestellt [38].

In zwei Kampagnen, jeweils im Herbst 2014 und 2015 haben Testpiloten-Schüler und Instruktoren der britischen Empire Test Pilots' School (ETPS) die Parameter des Flugreglers (FCS, von engl. Flight Control System) im Antwortverhalten Attitude Command zur Nutzung mit einem isometrischen, d.h. blockierten, Steuer optimiert. Die Software des FCS wurde dazu vom DLR so modifiziert, dass die FCS-Parameter bei Degradierung des Sidesticks vom nominellen Modus in den isometrischen Modus automatisch übergeblendet werden. Die von ETPS optimierten Reglereinstellungen stehen sowohl im AVES-Simulator als auch im ACT/FHS zur Systemdemonstration im Rahmen von AP 2.2 *Hardware Degradierungsaspekte* zur Verfügung. Aus den Reihen der ETPS konnte ein Promovierender zur vertiefenden Betrachtung dieser Thematik gewonnen werden.

Mit der Firma Wittenstein aerospace&simulation GmbH (WA&S) erfolgte eine intensive Zusammenarbeit bei der Herstellung und Optimierung des bestellten Steuerkraftsystems (CLS). Dazu gehörte die Schulung vor Ort, sowie die Beratung bei der Inbetriebnahme, sowie das Tuning der CLS nach der Montage neuer Griffe.



Teil II.

Eingehende Darstellung



II.1. Erzielte Ergebnisse

Nachfolgend werden die in den einzelnen Arbeitspaketen erzielten durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse dargestellt. Vorab wird jeweils die Aufgabenbeschreibung des Arbeitspakets laut Projektantrag wieder gegeben.

AP 2.1. Tactile Cueing

Das Hauptziel des Hauptarbeitspaketes Tactile Cueing liegt in der systematischen Identifikation und Umsetzung von taktilen Anzeigen für Betriebsgrenzen und für effektives Fliegen, sowie dem Nachweis ihrer Funktion. Ferner soll der Einfluss dieser Funktionen auf die Einsparung der direkten Betriebskosten eines Hubschraubers aufgezeigt werden, dazu steht der ACT/FHS mit seiner Test- und Entwicklungsumgebung auf DLR-Seite sowie auf Seiten AHD die Software HOST und andere Tools zur Verfügung.

AP 2.1.1. Auflistung potentieller Limits

Als Grundlage für die spätere Umsetzung soll eine Auflistung möglicher taktiler Anzeigen durch die aktiven Steuerorgane erstellt werden. Ferner sollen Kriterien definiert werden, die den Mehrwert der taktilen Anzeigen für den Betreiber quantitativ sichtbar machen können. So soll letztlich gezeigt werden, dass sich die höheren Kosten eines aktiven Steuerorgans sich durch eine Reduktion der Betriebskosten aufgrund eines verringerten Wartungsaufwands (scheduled, unscheduled) amortisieren, wenn spezielle Funktionen etwa zu einer Reduktion von Überschreitungen struktureller Limits führen. Darüber hinaus haben auch die Verbesserung der Flugeigenschaften und die Reduktion der Arbeitsbelastung einen direkten Einfluss auf die Sicherheit und damit einen Einfluss auf die Kosten. Bei diesem Arbeitspaket wird DLR durch AHD unterstützt. Die Aufgaben sind im Einzelnen:

- ➔ Sammlung aller Limits und
- ➔ Definition der Bewertungskriterien.

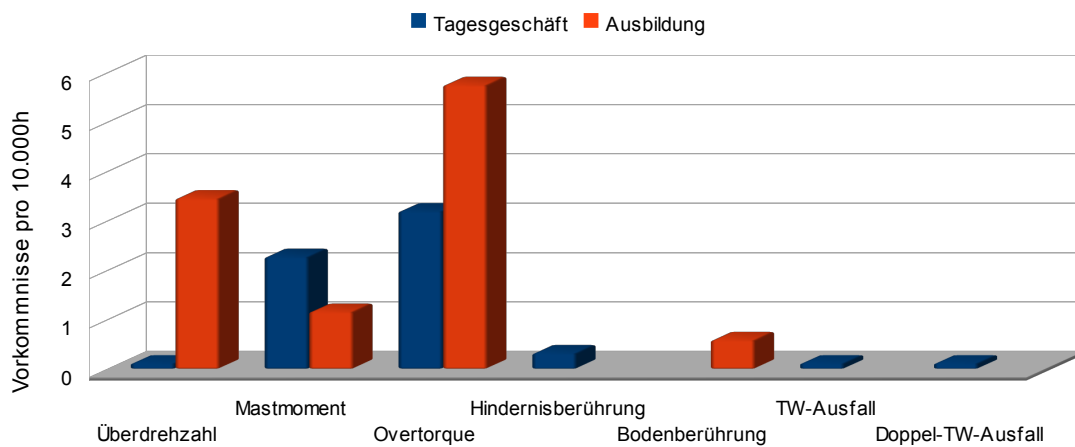
Sammlung relevanter Limits

Es gibt eine Vielzahl von Limits, die der Pilot beachten muss. Eine sehr detaillierte Übersicht zeigt eine amerikanisch-französischen Studie aus dem Jahr 1996 [19]. Für SiRaSKoF-H wurde eine eigene Studie zur Sammlung und Priorisierung konkreter relevanter Limits und Funktionen für die haptische Assistenz durchgeführt und in Form eines technischen Berichts [44] dokumentiert. Dafür wurden zehn Piloten eines zivilen Hubschrauberbetreibers im Bereich Rettung, Polizei, Transport und Ausbildung mit jeweils zwischen 700 und 11.000 h Flugerfahrung befragt und Vorkommnisse aus dem Flugdienst aus 115.000 Flugstunden ausgewertet. Nachfolgend sind die wichtigsten

Kennzahlen der Untersuchung aufgeführt.

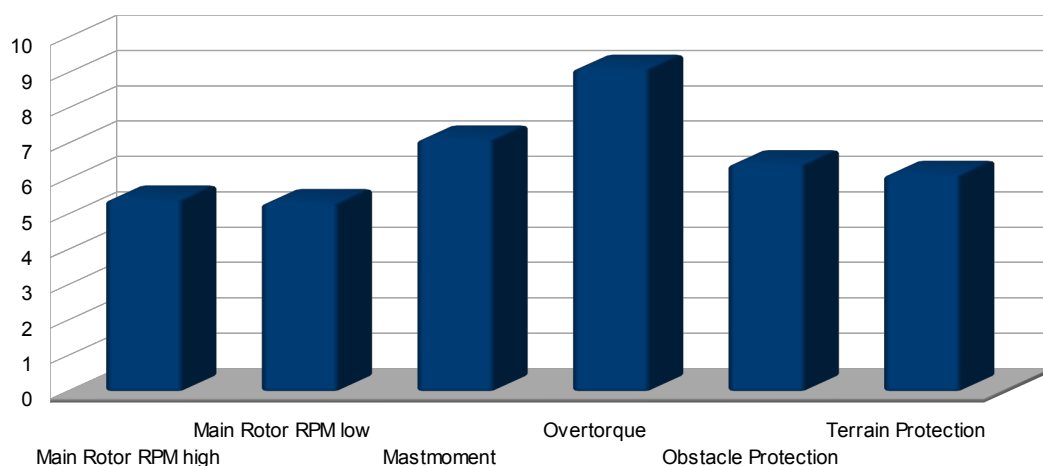
Die drei wichtigsten Vorkommnisse im Flugdienst (pro 10.000 Flugstunden, siehe Abbildung II.1.1:

1. **Überschreitung Triebwerksdrehmoment (Overtorque)** (8.9)
2. **Überdrehzahl** (3.5)
3. **Überschreitung Mast-Biegemoment (Mastmoment)** (3.4)



Die drei als am meisten relevant aus einer Vorauswahl genannten „Assistenzfunktionen für die Einhaltung von Betriebsgrenzen und Abwendung von Gefahren“ sind (Durchschnittsbewertung aller Piloten, die jeweils auf der Skala von 0: *völlig unnötig* bis 10: *absolut wünschenswert* angekreuzt haben, siehe Abbildung II.1.2):

1. **Overtorque** (9.1/10)
2. **Mast-Moment** (7.1/10)
3. **Obstacle-Avoidance** (6.4/10) und **Terrain Protection** (6.1/10) (zusammengefasst, da technologisch ähnlich)



Die drei als am meisten relevant aus einer Vorauswahl genannten „Assistenzfunktionen für die Manöverunterstützung“ sind (Durchschnittsbewertung aller Piloten, die jeweils auf der Skala von 0: *völlig unnötig* bis 10: *absolut wünschenswert* angekreuzt haben):

1. **IFR Turn/Safe Attitude Assistant** (5.3/10): Dabei wird ein Softstop in der lateralen Richtung des zyklischen Steuers berechnet, der als Referenz für das Fliegen eines Standardvollkreises ($360^\circ/2\text{min}$) dient.
2. **Haptic Hover** (5.2/10): Eine haptische Unterstützung für das Stabilisieren des Hubschraubers beim Hovern.
3. **V_{min}** (5.0/10): Eine Beschränkung der minimalen Geschwindigkeit durch einen Softstop am Pitch-Steuer, um ein Sinken im Langsamflug nahe am Triebwerksleistungsmaximum zu vermeiden. Wegen des höheren Leistungsbedarfs im Langsamflug kann es gerade im Manöver, bzw. Kurvenflug dazu kommen, dass nicht mehr genug Leistung zur Verfügung steht, um die Höhe zu halten.

Die drei Situationen mit der größten Belastung waren (jeder Pilot wurde aufgefordert 2-3 Situationen zu nennen):

1. **Schlechtes Wetter** (5/10)
2. **Nacht** (5/10)
3. **Landung in unbekanntem Gelände** (3/10)

Die meisten Piloten schätzen die Verwendung aktiver Sidesticks tendenziell als schon bald unverzichtbare Technologie ein 8.4/10 (Durchschnittsbewertung aller Piloten, die jeweils auf der Skala von 0: *völlig unnötig* bis 10: *schon bald unverzichtbar*).

Auswahl: Die folgenden drei Funktionen mit der höheren Punktzahl aus der Studie wurden zur weiteren Untersuchung folgendermaßen priorisiert.

1. **Engine-Torque-Limitation** korrespondierend mit der Cockpitanzeige First-Limit-Indicator (FLI) als Haptic-FLI. Diese wurde bereits vor dem Projektstart begonnen. Es hat bereits 2010 einen Funktionstest im ACT/FHS gegeben, welcher weiteren Optimierungsbedarf offengelegt hat [4]. Diese Funktion wurde weiterentwickelt und erprobt.
2. **Obstacle-Avoidance:** Eine haptische Funktion zur Kollisionsvermeidung (Obstacle-Avoidance / Terrain-Avoidance) wurde neu entwickelt und in einer Akzeptanzstudie im Simulator untersucht.
3. **Mast-Moment-Protection:** Es hat in SiRaSKoF-H keine Weiterentwicklung oder Evaluation dieser Funktion stattgefunden.

Bewertungskriterien

Zur Bewertung werden Kriterien benötigt. Dabei ist das unmittelbare finanzielle Einsparpotential der direkten Betriebskosten (DOC) gegenüber der konventionellen Steuerung von Interesse, z.B. durch niedrigere Kosten der Technologie selbst oder durch geringere Folgekosten. Das Einsparpotential der Folgekosten lässt sich wiederum unterteilen in direkte Kosteneinsparungen durch z.B. geringere Schäden oder Abnutzung und in indirekte Einflüsse, die aus einer effizienteren Nutzbarkeit des Hubschraubers wegen geringerer Pilotenermüdung und/oder Einsetzbarkeit auch bei schlechten Sichtbedingungen resultieren.

Zur Evaluierung der in SiRaSKoF-H entwickelten bzw. betrachteten Funktionen haptischer Assistenz werden die folgenden Kennzahlen ermittelt:

- **Anzahl der Limitüberschreitungen** durch Assistenzfunktionen zur Einhaltung von Betriebsgrenzen, wie z.B. Torque-Protection oder Mast-Moment-Protection. Dies kann anhand ausgewählter Flugaufgaben im Vergleich zu konventionellen Methoden überprüft werden. Als Kennzahl gilt hier die absolute Reduktion von Überschreitungen. Mit dieser Kennzahl kann dann auf die Kostenreduktion geschlussfolgert werden.
- **Beurteilung der Performanz** durch die qualitative Bewertung über Pilotenurteile. Dazu wird auf die klassische Flugeigenschaftsbewertung nach dem Cooper-Harper-Rating zurückgegriffen auf Basis der Kriterien des Aeronautical Design Standard, Performance Specification, Handling Qualities Requirements for Military Rotorcraft (ADS-33E-PRF) [20].
- **Beurteilung der Arbeitsbelastung** der Piloten durch standardisierte Interviews wie z.B. Nasa Task-Load-Index (Nasa-TLX). Ferner können auch Leistungsdaten aus Zweitaufgaben (secondary tasks) [21; 22] erhoben werden.

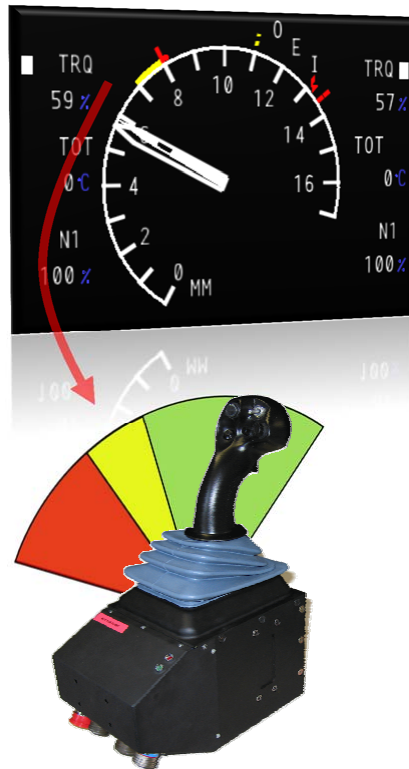
AP 2.1.2. Algorithmen

Im diesem AP sollen die Algorithmen zur Berechnung der Steuerpositionen für die taktilen Anzeigen, bzw. Tactile Cues erarbeitet werden. Dabei muss die gegebene Sensorumgebung im ACT/FHS berücksichtigt werden. Die Algorithmen müssen für die spätere Bewertung in das Experimentalsystem des ACT/FHS integriert werden. Die Aufgaben lauten im Einzelnen:

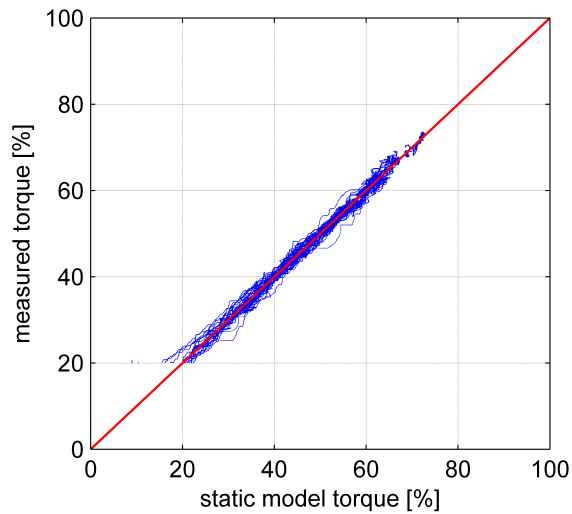
- Spezifikation, Identifikation der benötigten Sensorik,
- Entwicklung sowie
- Integration (Simulator, ACT/FHS).

Torque-Protection (Haptic-FLI)

Zur Anzeige des Torques dient in der EC 135 und damit im ACT/FHS der so genannten „First-Limit-Indikator (FLI)“. Dies ist ein Kombinationsinstrument für die Triebwerke, welches neben dem Torque auch die Parameter Triebwerkstemperatur und Kompressordrehzahl anzeigt. Dabei wählt eine Logik den Parameter zur Anzeige per Drehzeiger aus, welcher am dichtesten an seinem Limit ist, also das Limit, welches zuerst erreicht werden wird, das „First-Limit“. Die Skala der Anzeige enthält Markierungen, welche unterschiedliche Limit-Positionen anzeigen. Das Handbuch definiert, welche Limit-Position der Zeiger unter welchen Bedingungen nicht überschreiten darf. Der Pilot muss somit nur eine Anzeige im Blick behalten anstatt drei. Trotzdem bindet auch diese Anzeige noch Aufmerksamkeit, so dass der Pilot gerade bei Operationen nah am Limit sehr häufig auf die Anzeige schauen muss, d.h. seinen Blick nicht nach draußen wenden kann. Im Vorfeld von SiRaSKoF-H wurde bereits ein Tactile Cue entwickelt, der das Erreichen des Limits am Kollektivsteuer anzeigt. Die Funktionsweise des haptischen FLI besteht insbesondere darin, ein Tactile Cue für die Torque-Protection am Kollektivsteuer so zu platzieren, dass er mit der gültigen Begrenzungsmarkierung auf dem serienmäßigen First-Limit-Indicator-Display (FLI) korrespondiert: Haptic-FLI. Da der Torque verzögert auf die Steuereingaben reagiert, wäre es zu spät, das Tactile Cue erst dann zu aktivieren, wenn das Limit erreicht ist, da es dann schnell zu einem Übersteuern und einer Überschreitung des Limits käme. Durch einen Prädiktor wird daher berechnet, welcher Torque-Wert sich aus der



(a) Haptic-FLI-Konzept



(b) Prädiktor Übereinstimmung

Abbildung II.1.3.: Haptic-FLI

Steuereingabe ergibt, bzw. wo die zu einem Torque-Limit gehörige Steuerposition liegt. Ein Zustandsautomat wählt das aktuell gültige Torque-Limit gemäß Handbuch der EC135 T2+ aus. Für angezeigte Fluggeschwindigkeiten unterhalb von 65 kts gilt das Startlimit MTP (Maximum Take-off Power), für höhere Geschwindigkeiten das Dauerleistungslimit MCP (Maximum Continuous Power). In Abbildung II.1.3(a) ist diese Zuordnung schematisch dargestellt. Der Haptic-FLI wurde weiterentwickelt und für die Evaluation vorbereitet. Insbesondere der Torque-Prädiktor wurde im Rahmen von SiRaSKoF-H noch weiter verbessert, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Die Abbildung II.1.3(b) zeigt die Übereinstimmung der vom Torque-Prädiktor berechneten (static model torque) und der am ACT/FHS gemessenen (measured torque) Werte. 95 % der berechneten Werte liegen in einem Bereich $\pm 2\%$ um den gemessenen Wert. Der Haptic-FLI wurde erfolgreich im Simulator und Flugversuch evaluiert, wie im Abschnitt „[Evaluation Torque-Protection / Haptic-FLI](#)“ beschrieben (S. 31). Später wurden verschiedene Arten von Kraftverläufen für diese Funktion entwickelt, siehe Abschnitt „[Haptisches Vokabular](#)“ (S. 30) und im Simulatorversuch auf ihre Pilotenakzeptanz hin untersucht, Abschnitt „[Evaluation Haptisches Vokabular](#)“ (S. 36).

Haptische Hindernisvermeidung (Haptic-Obstacle-Avoidance)

Die haptische Hindernis-Kollisionsvermeidung (Haptic-Obstacle-Avoidance) beschäftigt sich mit der Darstellung von Kräften auf den aktiven Sidesticks zur Warnung des Piloten vor möglichen Kollisionen mit nahen Hindernissen. Dadurch soll durch die an den aktiven Sidesticks spürbaren Kräfte das

Situationsbewusstsein, vor allem bei schlechter Sicht, verbessert werden. Die Kräfte sollen dabei sowohl, intuitiv verständlich, Richtung und Nähe der umstehenden Hindernisse anzeigen, als auch Steuerempfehlungen zum rechtzeitigen Stoppen oder Ausweichen geben, ohne den Piloten beim Steuern und Stabilisieren des Hubschraubers zu stören. Dafür wurde die folgende Spezifikation aufgestellt:

1. Es soll ein haptisches Signal generiert werden, welches zur Vermeidung von Kollisionen mit Hindernissen (obstacles) oder dem Boden (terrain) dient.
2. Das haptische Signal soll als gerichtete Kraft ausgeführt werden und eine Steuerbewegung implizieren, welche eine Kollision vermeidet.
3. Zuerst soll ein rein reaktiver Algorithmus entwickelt werden, der erst dann wirkt, wenn drohende Kollisionen gerade noch abwendbar sind, ohne die Sicherheit zu gefährden und den Komfort zu stark einzuschränken.
4. Mit Hilfe des haptischen Signals soll es möglich sein, dass sich der Pilot oder die Pilotin auch bei eingeschränkter Sicht in der Hinderniskulisse orientieren kann.
5. Die Haptoc-Obstacle-Avoidance soll die Hindernisdaten aus der Sensordatenfusion des ACT/FHS verwenden, siehe Abbildung II.1.4. Bis zur Fertigstellung der Sensorfusionierung wird die Haptic-Obstacle-Avoidance auf statische Daten aus einer Datenbank zurückgreifen.
6. Es soll eine Logik entwickelt werden, welche den Hubschrauber in die Richtung ablenkt oder abbremst, welche das geringste Risiko für Kollisionen bietet.
7. Diese Logik soll ferner die Ausweichrichtung auswählen, welche intuitiv auch durch den Piloten oder die Pilotin gewählt werden würde, vorausgesetzt er/sie hätte die Informationen, die dem System zur Verfügung stehen.
8. Die Haptic-Obstacle-Avoidance soll für stabilisierte, bzw. geregelte Hubschrauber ausgelegt werden.
9. Die Fliegarkeit, bzw. Handling Qualities des Hubschraubers dürfen durch die Haptic-Obstacle-Avoidance nicht nachteilig beeinflusst werden.
10. Option: Je nach Projektfortschritt können später neben reaktiven Systemen zur Kollisionsvermeidung auch prädiktive Systeme untersucht werden, welche eine haptische Führung auf einem kollisionsfrei geplanten Ausweichpfad beinhalten.

Bei der Entwicklung der haptischen Obstacle-Avoidance wurde die Erfassbarkeit von Objekten und Terrain in der relevanten Hubschrauberumgebung als technisch möglich betrachtet. Die technische Machbarkeit wurde bereits im Projekt ALLFlight mit dem ACT/FHS gezeigt [23]. Dabei wird durch eine Sensordatenfusion eine statische Höhenkarte mit aktuell von den bordautonomen, optischen Sensoren erfassten Hindernis- und Höhendaten dynamisch aktualisiert und in einer Datenbank gespeichert, engl. „see and remember“. Die Haptic-Obstacle-Avoidance erhält ihre Daten aus dieser Datenbank und kann somit auch Hindernisse berücksichtigen, welche aktuell nicht im Sichtfeld liegen. Während der Entwicklung wurde mit einer statischen Hindernisdatenbank mit ausgewählten Objekten gearbeitet. Die Abbildung II.1.4 illustriert die digitale Höhenkarte einer real erfassten Szenerie.

Die Entwicklung der Algorithmen erfolgte in zwei Iterationen. Ein erster Prototyp wurde bereits 2012 im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt [45]. Dieser benutzt das relativ simple und schnelle *Separation-Axes-Theorem* zur Abstandberechnung (SAT). Dieses eignet sich zwar zur Kollisionsbestimmung von virtuellen, 3-dimensionalen Körpern und liefert eine Abstandsschätzung, aber nicht zwangsläufig den geringsten Abstand. Bei mehreren Hindernissen in Hubschraubernähe sprangen

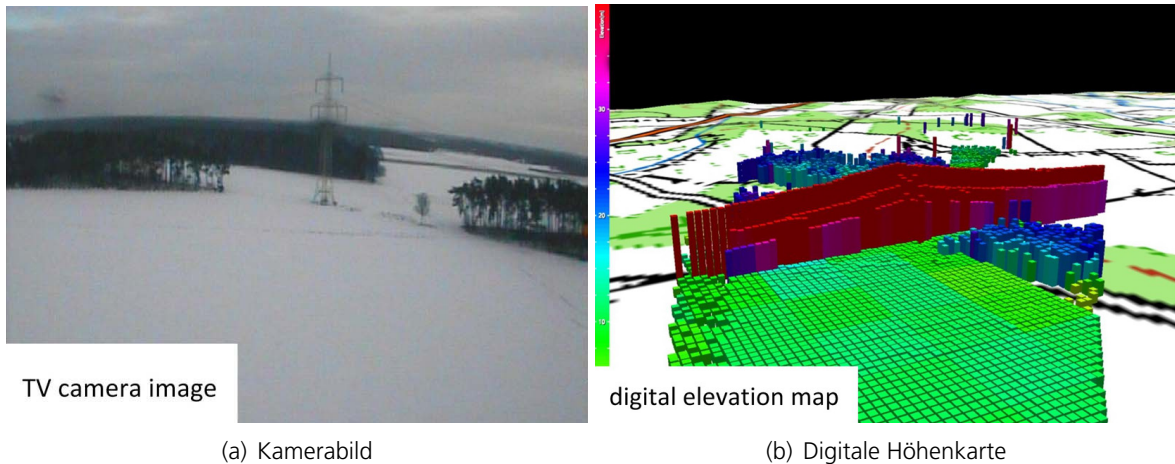


Abbildung II.1.4.: Digitale Höhenkarte aus Sensorfusion neben Kamerabild der Szenerie [23]

die Gegenkräfte daher stark in Betrag und Richtung. Dadurch ergab sich für die Piloten keine intuitiv verständliche Information über die genaue Lage der Hindernisse.

In einer weiteren Diplomarbeit [46] wurde ein System entwickelt und implementiert, welches auf dem so genannten *Gilbert-Johnson-Keerthi* Algorithmus beruht. Dieser kann iterativ den minimalen Abstand zwischen zwei benachbarten Körpern relativ genau und schnell genug für die Echtzeitberechnung annähern. Die Bedingung dafür ist, dass die Anzahl der zu prüfenden Hindernisse in Hubschraubernähe nicht zu groß ist. Daher enthält das System ein Modul zur progressiven Datenreduktion: Die Auflösung in größerer Entfernung zum Hubschrauber wird reduziert, während die Auflösung in unmittelbarer Nähe hoch bleibt. Der Hubschrauber wird zunächst durch einen einhüllenden Zylinder gemäß Abbildung II.1.5 repräsentiert.

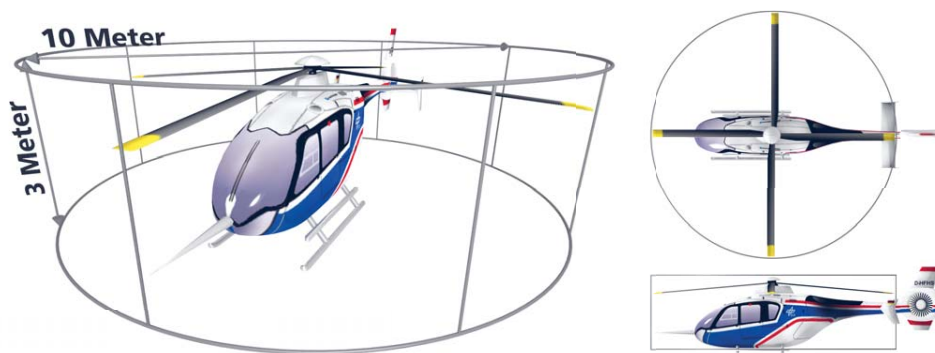


Abbildung II.1.5.: Hubschrauber-Einhüllende

Um diese Einhüllende herum wird ein parametrischer Potentialfeld gelegt, wie in der Literatur beschrieben [24]. In dieses gehen die aktuelle Flugrichtung und -geschwindigkeit mit ein und resultieren in einem Risikowert. Zur Realisierung wird darum das Potentialfeld nicht global beschrieben, sondern lokal begrenzt zylinderförmig um den Hubschrauber, wie in Abbildung II.1.5, wobei die Länge des Zylinders in Flugrichtung mit der Fluggeschwindigkeit und Beschleunigungsvermögen skaliert wird. Die Abbildung II.1.6 zeigt den generellen Aufbau dieses Potentialfeldes.

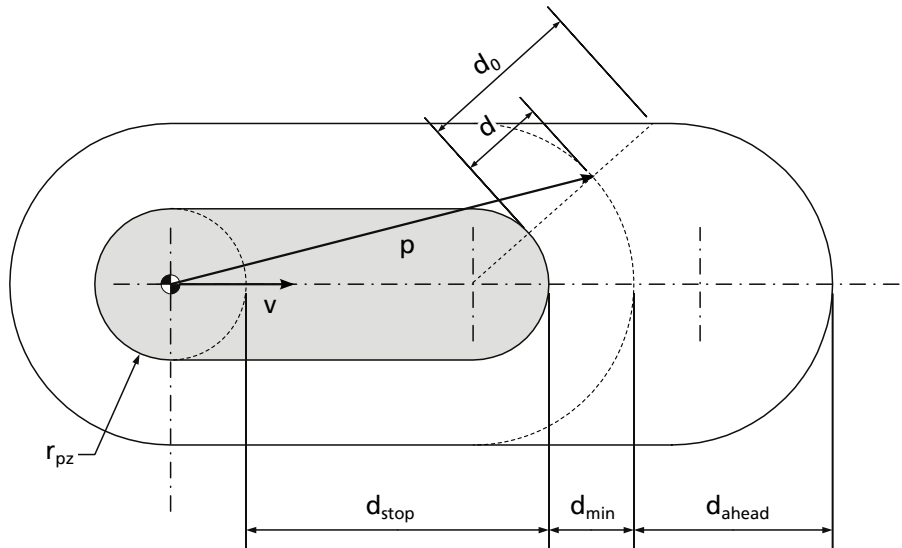


Abbildung II.1.6.: Parametric Risk Field, aus [24]

Die Parameter d_{stop} und d_{ahead} dienen zur Skalierung des Feldes, indem aus der aktuellen Fluggeschwindigkeit \vec{v} , dem Beschleunigungsvermögen a_{max} des Hubschraubers sowie der Warnzeit t_{ahead} der maximale Warn-Abstand d_{ahead} und die Stopp-Distanz d_{stop} bestimmt werden. Der Parameter d_{min} bezeichnet den Mindestabstand zu den Hindernissen, unterhalb dessen haptische Cues erzeugt werden sollen.

$$\begin{aligned}
 d_{stop} &= \frac{\|\vec{v}\|^2}{2 \cdot a_{max}} \\
 d_{ahead} &= \|\vec{v}\| \cdot t_{ahead}
 \end{aligned}
 \tag{II.1.1}$$

p bezeichnet die Position des Hindernisses zur aktuellen Hubschrauberposition, das in dem in Abbildung II.1.6 illustrierten Fall auf dem Radius von d_{min} liegt. Mit d , dem Abstand des inneren Risiko-Bereiches zu einem Hindernis, lässt sich ein Risikowert berechnen. Dieser wird bei drohender Kollision in Richtung und Betrag auf die vier Steuerachsen projiziert, so dass sich für jede Achse ein Risikowert ergibt. Dieser wird in einem weiteren Modul zur Definition und Auswahl verschiedener Kraftmuster weiter verarbeitet und beeinflusst die Intensität der Tactile Cues.

Die Software wurde mit Hilfe von statischen Tests verifiziert und abschließend in der Simulation durch zwei Piloten für einen einfachen Testfall validiert. Die Piloten bestätigten aber die Ansicht der Autoren, dass noch weiterer Bedarf bei der Abstimmung der Kräfte der Tactile Cues nötig ist. Dies ist im Arbeitspaket 2.1.3 *Steuerkraftanpassung Basis und Haptische Cues* geschehen. Das System enthält bereits eine Schnittstelle zur Anbindung an die Sensordatenfusion des ACT/FHS. Derzeit wird aber aus Gründen der Komplexitätsreduktion mit Fokus auf der Erforschung Tactile Cues mit einer statischen Datenbank mit ausgewählten Hindernissen gearbeitet.

Integration Experimentalsystem AVES und ACT/FHS

Die taktilen Funktionen wurden Ende 2014 vom Entwicklungsrechner in das Experimentalsystem des ACT/FHS übertragen und im Systemsimulator, später im EC 135 Cockpit des neuen DLR Simulatorzentrums AVES (Air Vehicle Simulator) getestet. Die Funktionen Haptic-Obstacle-Avoidance und

Haptic-FLI stehen damit für die Erprobung sowohl im AVES-Simulator, und durch die Kompatibilität des Experimentalsystems auch im ACT/FHS zur Verfügung. Der Haptic-FLI wurde bereits im ACT/FHS erprobt, die Erprobung der Haptic-Obstacle-Avoidance im ACT/FHS steht noch aus, siehe auch Verfügbarkeit ACT/FHS im Abschnitt „Voraussetzungen“ (S. 10).

AP 2.1.3. Steuerkraftanpassung Basis und taktile Anzeigen

Die Limitposition muss dem Piloten merklich angezeigt werden, ohne ihn bei der Kontrolle des Hubschraubers zu stören. Da über die taktilen Cues mehr als ein Limit angezeigt wird, muss sicher gestellt werden, dass sich diese nicht gegenseitig stören und dass der Pilot unterscheiden kann, welches Limit ihm gerade angezeigt wird. Er muss dazu aus der Art des Cues schließen können, welche Kritikalität dem Limit zugrunde liegt. Über die Rezeption unterschiedlicher taktiler Cues stehen aufgrund der Neuheit dieser Technologie nur wenige Informationen zur Verfügung. Daher soll im Rahmen dieses AP ein haptisches Vokabular entwickelt und getestet werden, welches die Kritikalität auf intuitive Weise kommuniziert. Um die Eindeutigkeit einzelner Cues auch bei nahe beieinander liegenden Cue Positionen zu gewährleisten, wird untersucht, wie sich die Cues arbitrieren lassen:

- Anpassung der Sidestick-Basis-Krafteinstellungen,
- Ausarbeitung eines haptischen Vokabulars für die taktile Anzeige,
- Arbitration konkurrierender Cues und
- Bewertung anhand geeigneter Flugaufgaben.

Sidestick-Basiskrafteinstellungen

Für die anfangs in der Entwicklungsumgebung verwendete Hubschraubersimulation *Helifly* konnten für die Reglermodi (Upper Modes) Rate-Command (RC), Attitude-Command (AC) und Translational-Rate-Command (TRC) optimierte Basiskrafteinstellungen für aus der Dissertation von Thorben Schönenberg [25] übernommen werden. Diese wurden in das Softwaremodul für die Ansteuerung der aktiven Sidesticks (*ACS-Modul*) implementiert. Das *ACS-Modul* und *Helifly* wurde dazu so modifiziert, dass die Reglermodi und die Sidestickparameter synchron überblenden können. Das Blenden kann durch Schalter-Betätigung oder automatisiert bei Über-, bzw. Unterschreiten von Geschwindigkeitsgrenzen ausgelöst werden. Als Option wurde auch ein Entwurf für das Auslösen durch das Überschreiten von Kraftschwellen implementiert. Dies soll eine noch intuitivere Kontrolle der Transitionen durch den/die Pilot/in ermöglichen. Die Abbildung II.1.7 zeigt exemplarisch den Verlauf der Aktivierung der einzelnen Flugreglermodi in Abhängigkeit der Betätigung von Richtungsschaltern am rechten Sidestick: Schalter nach links bedeutet weniger Reglerunterstützung, Schalter nach rechts bedeutet mehr Unterstützung. Der gesamte Überblendmechanismus ist in einem Institutsbericht [47] näher erläutert. Damit die automatische Überblendung auch mit der Modellfolgeregelung des ACT/FHS funktioniert, müssen noch Anpassungen vorgenommen werden. Dies betrifft insbesondere die Transitionen zwischen den Upper-Modes und der zugehörigen Steuerkrafteinstellungen.

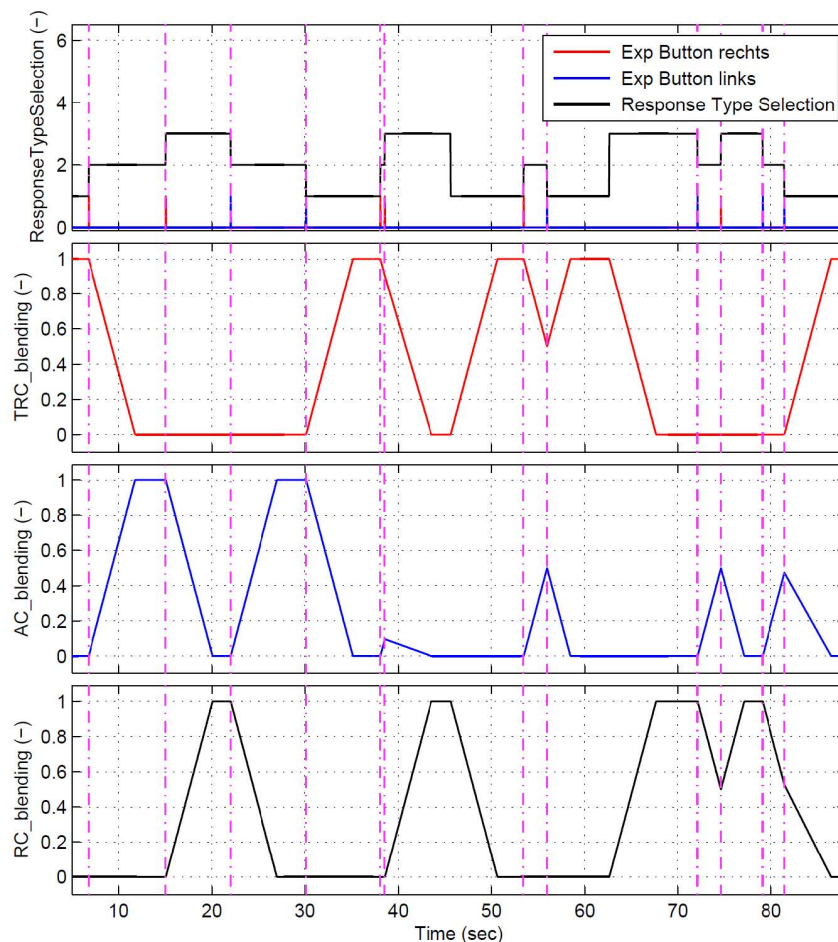


Abbildung II.1.7.: Parameter Blending

Haptisches Vokabular

Basierend auf den vorhandenen Funktionen Haptic-Obstacle-Avoidance und Haptic-FLI wurden zusammen mit dem Berufspiloten Roger Dögow im Rahmen seiner vom DLR betreuten Bachelorarbeit verschiedene Konzeptvorschläge für *taktile Anzeigen* erarbeitet. Bei der bisherigen Umsetzung des *Haptic-FLI* (siehe S. 24) wurde lediglich das aktuelle maximale Limit per Tactile Cue angezeigt, d.h. entweder das MTP-Limit oder das niedrigere MCP-Limit. Laut Dögow würden viele Piloten, wie er selbst, aber auch darauf achten, ob sie bereits das niedrigere MCP Limit überschritten haben, und sich damit im Takeoff-Power (TOP) oder „gelben Bereich“ befinden, auch wenn dieses laut Flughandbuch für Fluggeschwindigkeiten niedriger als 65 kts erlaubt ist. Im TOP-Bereich würden sie entsprechend vorsichtiger agieren, da sie dort dem MTP-Limit bereits sehr nahe sind und es nicht zu versehentlichen Überschreitung kommen soll. Herr Dögow hat daher zwei unterschiedliche Konzepte für den Kraftverlauf eines Tactile Cues für diesen Geschwindigkeitsbereich ausgearbeitet, die den Piloten informieren sollen, dass er in den TOP-Bereich eintritt. Anders als bei der Anzeige des maximalen Limits soll dabei aber nicht die Intention vermittelt werden, diesen Bereich möglichst verlassen zu müssen. Der bisher verwendete Softstop, mit seiner Eigenschaft, eine wegabhängig steigende Rückstellkraft aufzubauen, erschien hier also ungeeignet. In dem ersten Konzept, genannt „Reibungsstufe“, siehe Abbildung II.1.8(b), wird die Schwelle zu TOP durch eine Erhöhung

der Reibung kenntlich gemacht. Diese wurde vom DLR so implementiert, dass im TOP-Bereich beim Ziehen, d.h. bei der Bewegung in Richtung höherer Leistung, eine höhere Reibung überwunden werden muss als beim Drücken. An der oberen Grenze des TOP-Bereichs wird ein Softstop eingeblendet, der zur Unterscheidbarkeit deutlich höhere Endkräfte aufweist als die Reibung. Bei Überschreitung des oberhalb des TOP-Bereichs liegenden transienten Limits wird zudem ein Stickshaker aktiviert. Das zweite Konzept „Raste“ setzt an Stelle der erhöhten Reibung im TOP-Bereich eine Raste, engl. Detent, an die untere Grenze des TOP-Bereiches, siehe Abbildung II.1.8(c). Dadurch soll der Pilot den Eintritt in den TOP-Bereich spüren. Damit das Steuer beim Feinsteuern im Bereich des Detent nicht permanent abgelenkt wird, erfolgt eine automatische Deaktivierung, sobald sich das Steuer für kurze Zeit, etwa 1 s, im unmittelbaren Bereich der Raste befindet. Bei größer werdendem Abstand wird der Detent wieder aktiviert. Bei beiden Konzepten wird das maximale Limit, weiterhin durch einen Softstop am MCP-Limit dargestellt, siehe Abbildung II.1.8(a).

Auch für die Haptic-Obstacle-Avoidance wurden zwei Konzepte umgesetzt. Das Konzept „Kraft und Steifigkeit“ beinhaltet sowohl eine Gegenkraft, die aus Richtung des Hindernisses wirkt und mit geringer werdendem Abstand ansteigt, als auch einen Steuerkraft-*Gradienten*, der in Richtung des Hindernisses höher ausfällt als in den anderen Steuerrichtungen, siehe Abbildung II.1.9(a). Dieses Konzept geht ursprünglich auf die Arbeit von Lam [24] zurück. Das zweite Konzept beinhaltet einen so genannten „Ticker“, siehe Abbildung II.1.9(b). Hier wirken pulsformige Kräfte auf den Si-destick, deren Frequenz und Amplitude höher werden, je dichter der Hubschrauber dem Hindernis kommt. Auch hier wirken die Pulse aus Richtung des Hindernisses.

AP 2.1.4. Bewertung

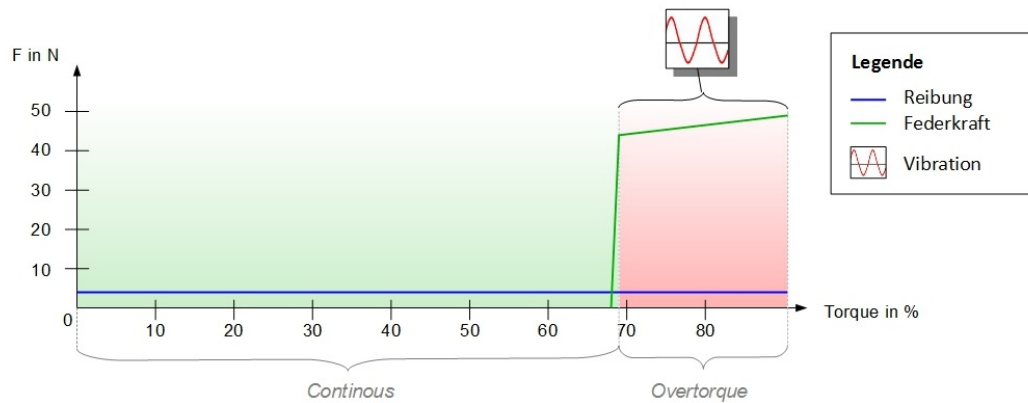
Abschließend wird in AP 2.1 das Gesamtsystem für das Tactile Cueing mit mehreren aktiven Limits inklusive des ausgewählten haptischen Vokabulars und des Arbitrierungs-Algorithmus evaluiert. Dies erfolgt gemeinsam mit AHD und DLR in der ACT/FHS Testumgebung. Dabei wird überprüft, inwieweit das Tactile-Cueing-Systems die geforderten Ziele erfüllt:

- Versuchsausarbeitung,
- Durchführung und Evaluation,
- Ableitung des Einflusses auf die Betriebskosten (Dieses Unterarbeitspaket wird von AHD bearbeitet)
- Auswertung und Dokumentation.

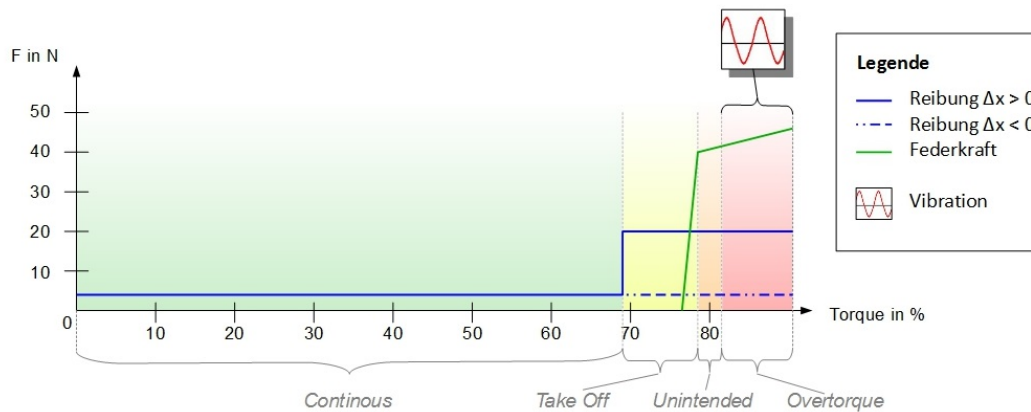
Evaluation Torque-Protection / Haptic-FLI

Der *Haptic-FLI* wurde Ende 2012 in Flugversuchen mit dem ACT/FHS zunächst demonstriert und später evaluiert. Anfang 2013 wurde diese Evaluation mit vier Piloten im Bodensimulator wiederholt. Tabelle II.1.1 listet die durchgeführten Versuche auf. Die Ziele bestanden darin, sowohl die korrekte Funktionalität als auch die erwartete Reduzierung der Arbeitsbelastung im Cockpit nachzuweisen. Dazu wurden zunächst zwei geeignete Szenarien definiert, welche die Piloten veranlassen sollten, die maximal zur Verfügung stehende Triebwerksleistung abzurufen, d.h. bis an die aktuell gültigen Drehmomentgrenzen zu gehen.

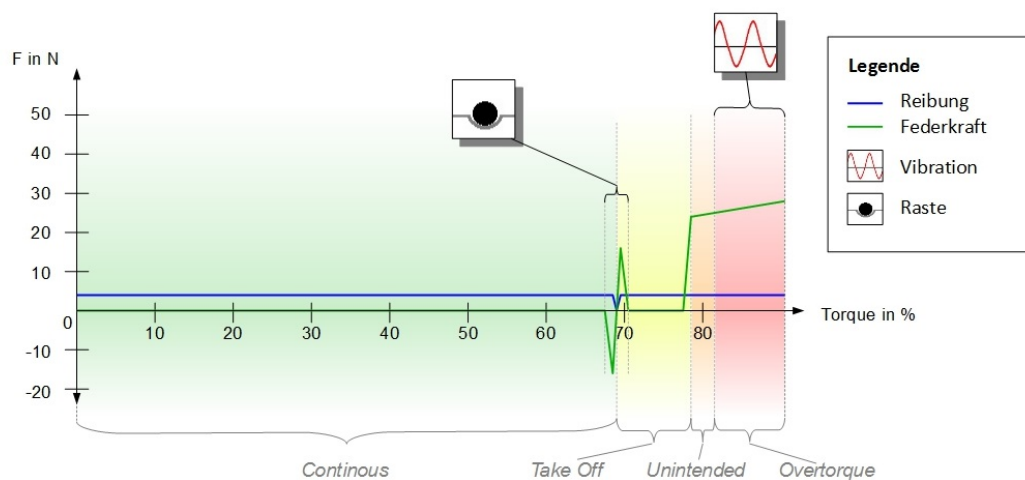
Es wurden zwei Manöver entwickelt, die keine speziellen externen Referenzen oder Testaufbauten erfordern. Das erste Manöver war das so genannte *Whiteout-Escape*-Manöver. Bei diesem soll der



(a) Haptic-FLI, $v \geq 65$ kts: Softstop

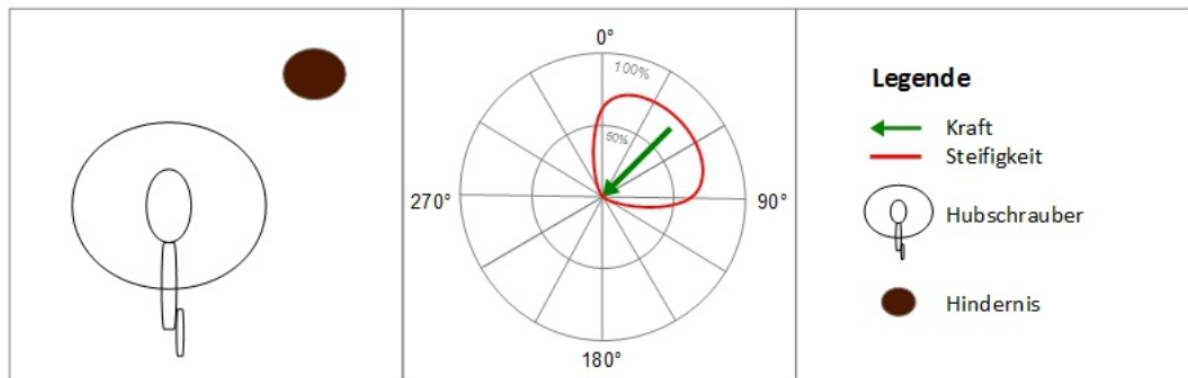


(b) Haptic-FLI, $v < 65$ kts: Konzept Reibungsstufe

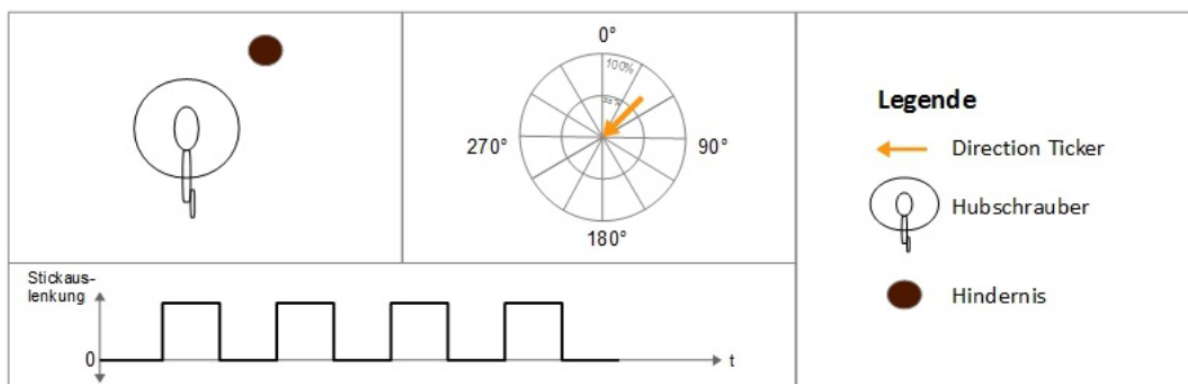


(c) Haptic-FLI, $v < 65$ kts: Konzept Raste

Abbildung II.1.8.: Haptic-FLI Konzepte von Dögow [48]



(a) Haptic-Obstacle-Avoidance: Steifigkeit und Kraft [48] basierend auf [46]

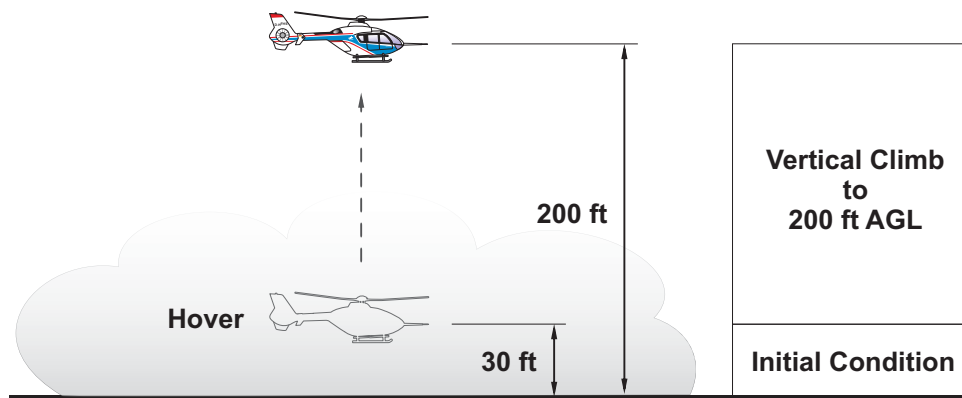


(b) Haptic-Obstacle-Avoidance: Ticker [48] basierend auf [46]

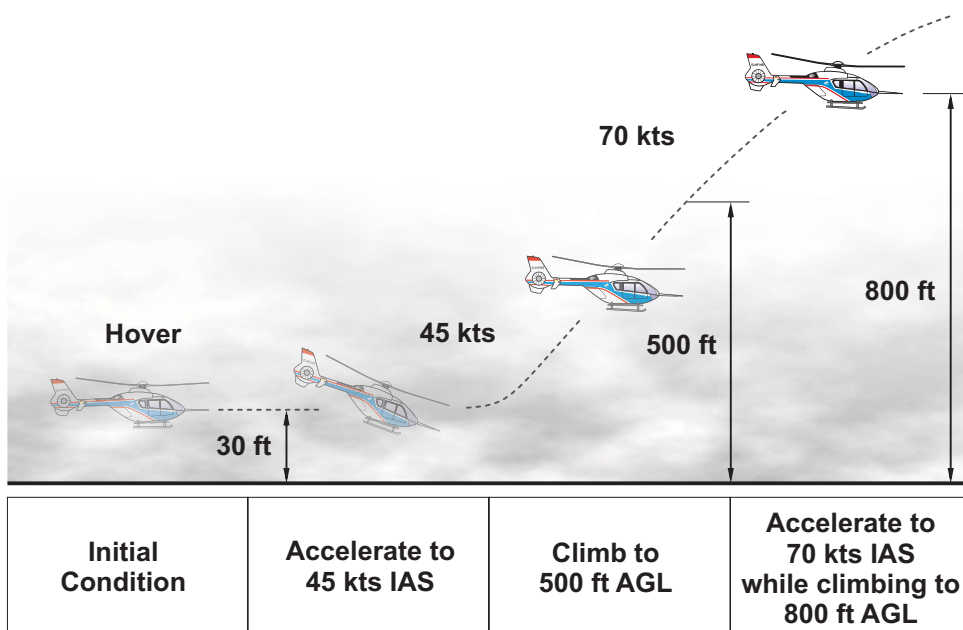
Abbildung II.1.9.: Haptic-Obstacle-Avoidance Konzepte von Dögow [48]

Tabelle II.1.1.: Haptic-FLI Demonstrationen und Evaluationen in 2012

11. Oktober 2012	ACT/FHS Demonstration mit ETPS Ausbilder (Testpilot), Kommentar: <i>Optimal workload reducer for takeoff!</i>
12. November 2012	ACT/FHS Systemtest DLR Pilot
22./23. November 2012	Systemsimulator Evaluation System und Reduktion der Arbeitsbelastung (Pilot A, externer Testpilot), Kommentar: <i>Mit Haptic-FLI absolut niedrige Workload!</i>
07. Dezember 2012	ACT/FHS Evaluation System und Reduktion der Arbeitsbelastung (Pilot B)
23. Januar 2013	Systemsimulator Evaluation System und Reduktion der Arbeitsbelastung (Pilot B)
30. Januar 2013	Systemsimulator Evaluation System und Reduktion der Arbeitsbelastung (Pilot C)
21. Februar 2013	Systemsimulator Evaluation System und Reduktion der Arbeitsbelastung (Pilot D)



(a) Whiteout-Escape-Schema

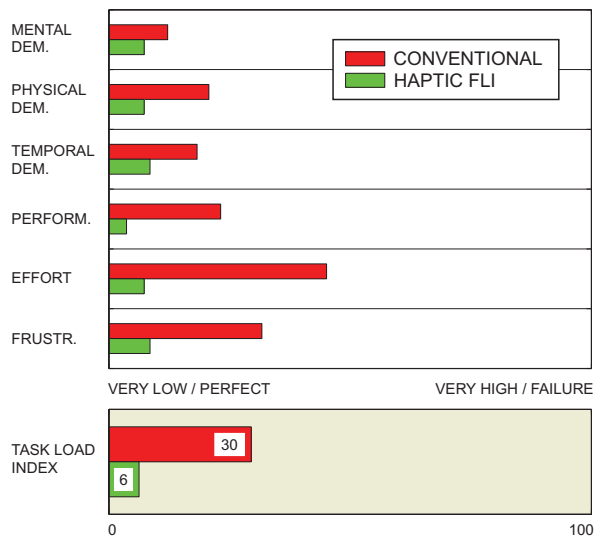


(b) Fog-Departure-Schema

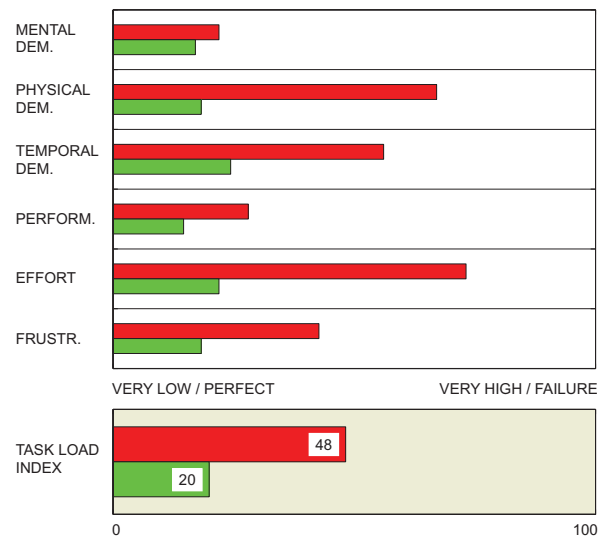
Abbildung II.1.10.: Haptic-FLI Evaluations-Manöver [39]

Pilot mit *Maximum Takeoff Power (MCP)* senkrecht nach oben wegsteigen, nachdem er in einen, hier fiktiven, Whiteout geraten ist. Dieser Kontext erzeugt die nötige Dringlichkeit und motiviert das Steigen mit maximalem Drehmoment. Abbildung II.1.10(a) stellt das beschriebene Manöver dar. Das zweite Manöver ist komplexer. Der Pilot hatte die Aufgabe, einen Start bei (fiktivem) Bodennebel durchzuführen. Dabei mussten bestimmte Vorgaben beachtet werden. Eine Illustration gibt Abbildung II.1.10(b). Zunächst sollte aus dem Schwebeflug auf die Geschwindigkeit des sicheren Steigens v_{TOSS} beschleunigt werden. Daraufhin sollte mit dieser Geschwindigkeit so schnell wie möglich auf die Obergrenze des Nebels gestiegen werden, d.h. unter Nutzung des *MCP-Ratings*. Bei Erreichen dieser Höhe sollte der Steigflug bei höherer Geschwindigkeit fortgesetzt werden, wodurch das maximal erlaubte Drehmoment auf das *Maximum Continuous Power Rating (MCP)* herabgesetzt wurde.

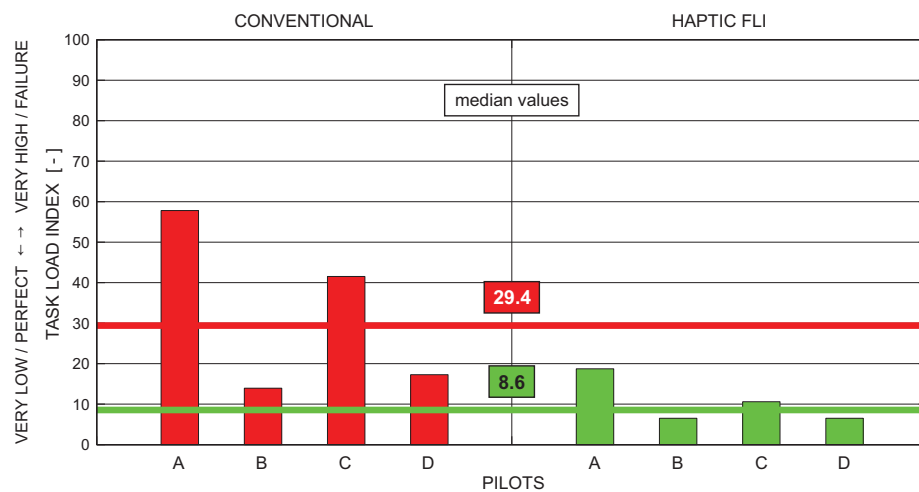
Für die Evaluation wurden beide Manöver zum Vergleich jeweils bei ausgeschalteter und bei eingeschalteter *Haptic-FLI*-Funktion geflogen. Die subjektive Arbeitsbelastung des Piloten wurde durch



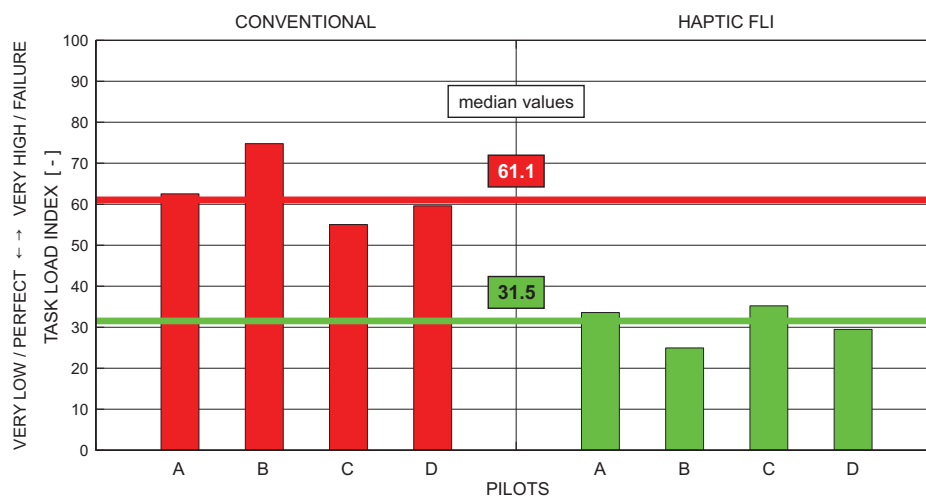
(a) Whiteout Escape, ACT/FHS, Pilot B



(b) Fog Departure, ACT/FHS, Pilot B



(c) Whiteout Escape, Simulator, Pilots A-D



(d) Fog Departure, Simulator, Pilots A-D

Abbildung II.1.11.: NASA-TLX Evaluation des Haptic-FLI

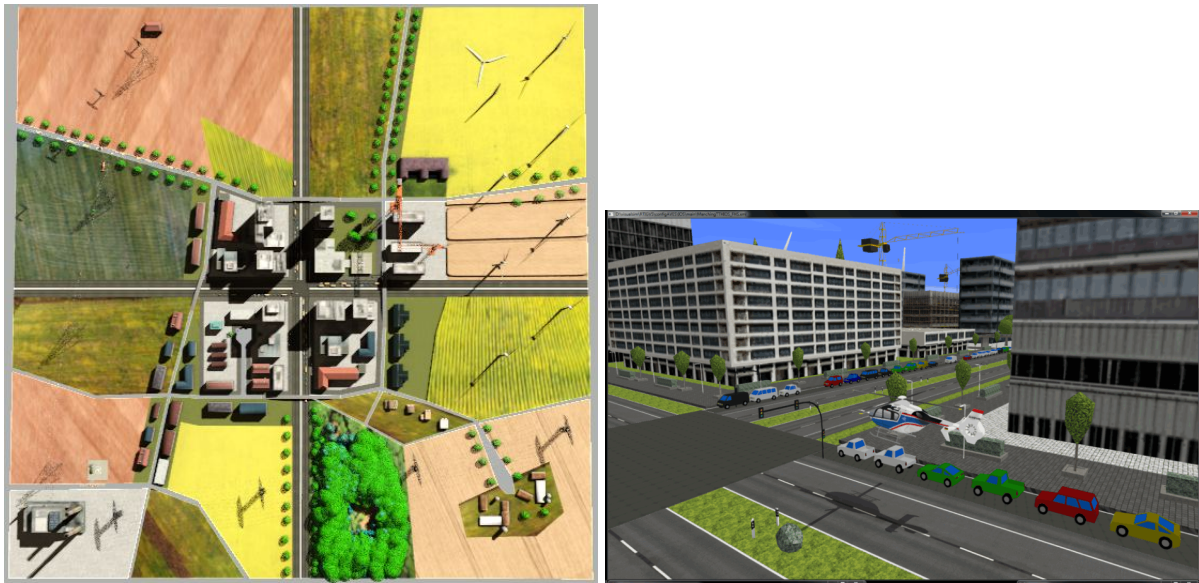
einen NASA-TLX-Fragebogen abgefragt. Die Abbildungen II.1.11(a) und II.1.11(b) zeigen die Antworten des Piloten für die einzelnen Rubriken der TLX-Bewertung (oben) und die gewichteten Summen dieser Rubriken (unten), d.h. die TLX-Werte selbst. Diese werden als Paare jeweils für die beiden Konfigurationen – ohne und mit aktivierter *Haptic-FLI*-Funktion – gegenübergestellt. In beiden Manövern wurde eine deutliche Reduktion der Arbeitsbelastung durch die *Haptic-FLI*-Funktion bewertet. Ähnliche Ergebnisse zeigen die zusammengestellten TLX-Werte der vier Piloten aus den Simulatorversuchen. Abbildung II.1.11(c) und II.1.11(d) zeigen die TLX-Werte für alle Piloten der Simulatorerprobung. Auch hier ergibt sich bei beiden Manövern eine deutliche Reduktion der Arbeitsbelastung durch die *Haptic-FLI*-Funktion. Die Entwicklung, Implementierung und Evaluation der *Haptic-FLI* wurden in einem Konferenzbeitrag auf dem AHS Forum 2013 veröffentlicht [39].

Obstacle City

Für die spätere Evaluierung der Haptic-Obstacle-Avoidance wurde die virtuelle Obstacle-City für den Simulationsbetrieb von einem Piloten der Bundespolizei aufgebaut [49]. Diese wurde auf der Grundlage von Pilotenbefragungen zu relevanten Szenarien aus dem Rettungseinsatz erstellt und in einer virtuellen Stadt mit ländlicher Umgebung auf einer Fläche von 1000 m mal 1000 m kombiniert, siehe Abbildung II.1.12. Darunter sind z.B. Landeplätze auf einer von Hochhäusern flankierten Straßenkreuzung, auf einem Krankenhaus oder in einer Waldlichtung. Die gesamte Szenerie ist mit leicht übersehbaren Luftfahrthindernissen durchsetzt, wie etwa Ampeln, Windrädern oder Hochspannungsleitungen. Zudem sind Objekte vorhanden, die sich später animieren lassen, d.h. bewegt werden können, etwa drehbare Kräne oder Fahrzeuge auf der Straße. *Obstacle City* wurde in die Sichtdatenbasis der Hubschraubersimulation integriert. Dazu wurde die Modellkomplexität verringert, damit sie durch die Sichtrechner in Echtzeit berechnet und ruckelfrei im Projektionssystem dargestellt werden kann. Außerdem wurden die Objekte, wie z.B. Hochspannungsleitungen und Bäume, so modifiziert, dass sie von der Sensor-Simulationssoftware *f3s* korrekt detektiert werden können und somit auch der Haptic-Obstacle-Avoidance übermittelt werden können.

Evaluation Haptisches Vokabular

Ende 2014 wurden die im Abschnitt *Haptisches Vokabular* beschriebenen Konzepte in einer explorativen Evaluation im AVES unter rein qualitativen Gesichtspunkten von drei EC135 Piloten der Bundespolizei untersucht. Es gab im Wesentlichen drei Ziele: Zum einen sollte die Pilotenakzeptanz eines Haptic-FLI und einer Haptic-Obstacle-Avoidance im Allgemeinen untersucht werden. Zum anderen sollte untersucht werden, welche der gezeigten Konzeptalternativen des haptischen Vokabulars für die beiden Funktionen bevorzugt wird. Ein weiteres Ziel bestand darin, Verbesserungsvorschläge von den Piloten zu erfahren. Die Evaluation fand in der virtuellen Umgebung der *Obstacle City* statt. Hier konnten die Piloten größtenteils frei maneuverieren, wurden aber auch aufgefordert, bestimmte Manöver zu fliegen, um alle Aspekte der Funktionen kennen zu lernen. Dazu gehörten z.B. Start- und (abgebrochene) Landung auf einer Straßenkreuzung sowie die bewusste Annäherung an Hindernisse, wie Hochhäuser und Ampelmasten. Jeweils im Anschluss an die Teilversuche wurden die Eindrücke der Piloten durch einen Fragebogens abgefragt. Als wesentliche Ergebnisse dieser Studie können die nachfolgenden Punkte festgehalten werden:



(a) Gesamtansicht, von oben

(b) Simulatorsicht, Kreuzung Detail mit ACT/FHS

Abbildung II.1.12.: Obstacle City [49]

Ergebnisse Haptic-FLI

1. Allgemein: Die Ausgestaltung der Cues, d.h. die Krafthöhe und die Softstop- Breite hat einen starken Einfluss auf das Pilotenvotum, d.h. die Bewertung eines Konzepts hängt auch von der Festlegung der Kraftniveaus ab.
2. Das Konzept „Reibungsstufe“ wurde von allen Piloten durchweg als hilfreich und als intuitiv verständlich bewertet. Ein Pilot sagte, der Vorteil sei, dass er zu jedem Zeitpunkt gewusst habe, in welchem Leistungsbereich sich der Hubschrauber gerade befunden hat.
3. Das Konzept „Raste“ wurde von zwei Piloten nicht ganz so gut bewertet wie das Konzept „Reibungsstufe“. Diese wurde als zu schwach empfunden. Der dritte Pilot kam mit dem Konzept zunächst nicht klar. Daraufhin wurden die Kraftschwellen der Raste und des Softstops deutlich erhöht. In der Bewertung fiel das Votum daraufhin deutlich besser aus, als für die „Reibungsstufe“. Auch die „Raste“ sollte daher weiter untersucht werden.
4. Das Hinzufügen einer „Raste“ zum Konzept „Reibungsstufe“ sollte weiter verfolgt werden.
5. Der Shaker wurde in der gezeigten Implementierung nicht erst bei einer tatsächlichen Überschreitung des „Transient Limits“ aktiviert, sondern auf der Basis des für einen Zeithorizont von ca. 2 s vorausberechneten Drehmoments bereits bei einer drohenden Überschreitung. So war es möglich, das Kollektiv nach dem Spüren des Shakers rechtzeitig wieder zu senken und einer Torque-Überschreitung zuvorzukommen. Dies wurde als wünschenswert angemerkt: „Der Shaker ist gut als Hinweis (für die drohende Überschreitung). Für die Überschreitung gibt es ja den Gong.“.

Ergebnisse Haptic-Obstacle-Avoidance

1. Das Konzept „Gegenkraft und Gradient“ wurde eher neutral, denn als intuitiv verständlich bewertet und von einem Piloten als eher störend eingestuft. Dabei empfand er permanent wirkende Kräfte am Steuer als einschränkend. Der Gradient wurde erst dann deutlicher spürbar, wenn das Steuer weiter ausgeschlagen wurde.
2. Das Konzept „Ticker“ wurde von allen Piloten dagegen als intuitiv verständlich und wünschenswert empfunden.
3. Unabhängig vom Konzept konnten manche Piloten zwar die Richtung erkennen, in welcher der Cue wirkte, aber nicht die Orientierung, d.h. es war z.B. erkennbar, dass das Objekt sich entweder links vorn oder rechts hinten befunden haben musste, aber eben nicht unterscheidbar wo. Hier half das Wissen über die Bewegungsrichtung des Hubschraubers „Wenn ich mich nach links bewege, kann es ja nur links sein“. Ein Pilot konnte beide Konzepte intuitiv richtig deuten.
4. Anders als beim *Haptic-FLI* wurde hier auch angemerkt, dass es zunächst schwer falle zu interpretieren, ob es sich um eine Kollisionsvermeidung handle und nicht um einen Fehler im Sidestick. Wenn man das wisse, fiel das Vertrauen leichter.
5. Erste Tests lassen vermuten, dass die Veränderung des Signalerverhältnisses des Tickers dabei hilft, besser zu erkennen, ob das Hindernis vor oder hinter dem Hubschrauber liegt. Die Pause zwischen den Pulsen sollte dabei länger sein als die Pulse.
6. In der Vorbereitung der Studie wurde nach wenigen Versuchen mit verschiedenen Pulsformen entschieden, nur rechteckförmige Impulse zu verwenden. Weitere Pulsformen wurden noch nicht systematisch untersucht.
7. Generell gilt auch für die Haptic-Obstacle-Avoidance, dass die Höhe der Kraft, bzw. Kraftpulse, und die Frequenz einen starken Einfluss auf die Verständlichkeit der Cues haben.
8. Bei der weiteren Optimierung des „Tickers“ muss die Stabilität gewährleistet sein. Dieser könnte die Stabilität des Hubschraubers gefährden, wenn er zu Steuerausschlägen im Frequenzbereich der Eigenmoden des Hubschraubers führt. Dies muss bei der Auslegung beachtet werden.

Die Abbildung [II.1.13](#) zeigt zusammenfassend den Vergleich der Erwartungshaltung an die haptischen Assistenzfunktionen vor und nach der Demonstration. Vorab wurden die Piloten nach ihrer Erwartung bezüglich der Nützlichkeit und ihrem Wunsch nach dieser Art der Unterstützung befragt. Alle Piloten zeigten vorab eine aufgeschlossene Haltung an beide Funktionen. Nach der Demonstration wurden ihnen dieselben Fragen nocheinmal gestellt. Die Antworten waren ähnlich. Damit wird einem System zur haptischen Unterstützung für die Torque-Überwachung und für die Obstacle Avoidance prinzipiell eine hohe Akzeptanz ausgesprochen. Dazu sind jedoch noch weitere Optimierungen der Kraftmuster erforderlich.

Die Studie wurde im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit zusammen mit einem Piloten der Bundespolizei vorbereitet, durchgeführt und von diesem ausgewertet und dokumentiert [\[48\]](#).

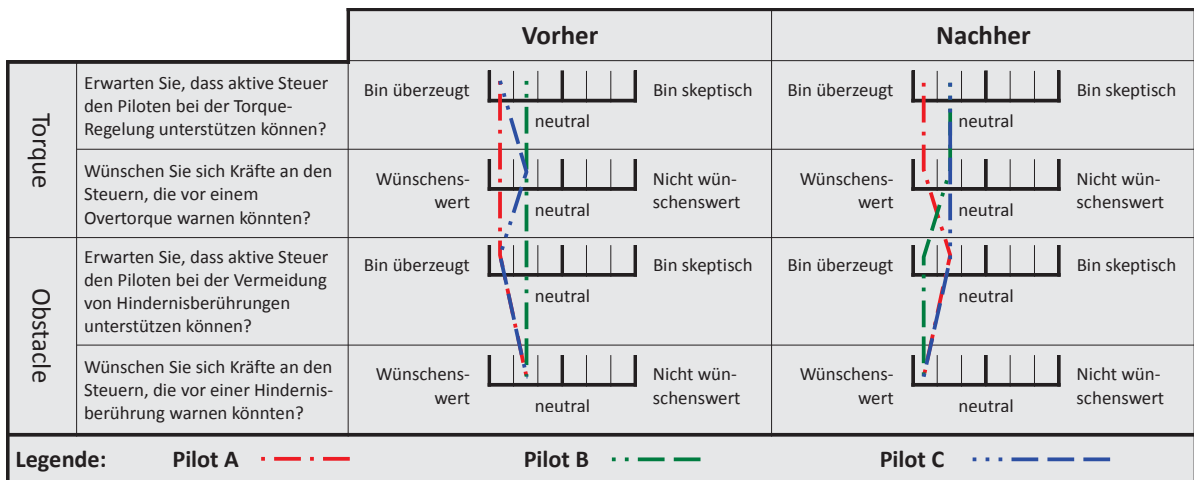


Abbildung II.1.13.: Haptisches Vokabular Erwartungsabfrage vorher/nachher von Dögow [48]

AP 2.2. Sidestick Hardware Degradierungsaspekte

In diesem Arbeitspaket (HAP) sollen die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Systemkomponente aktiver Sidestick im Gesamtsystem geregelter Hubschrauber beurteilt werden. Komplementär zu der Entwicklung der sicheren Sidestick-Hardware in HAP 1 soll hier überprüft werden, welche Degradierungen des aktiven Sidesticks in definierten, alternativen oder Backup-Betriebsarten toleriert werden können, ohne einen sicheren Hubschrauberflug samt sicherer Landung zu gefährden. Dies ist insofern wichtig, als dass durch eine höhere Toleranz bei der Zuverlässigkeit der Teilkomponenten auf Redundanzen verzichtet werden könnte und damit Gewicht und Kosten eingespart werden könnten. Dabei wird auch untersucht, welcher Grad an zusätzlicher Flugreglerunterstützung erforderlich ist. Von Interesse ist neben der Steuerbarkeit in den Degradierungsmodi auch die Handhabbarkeit von Transitionen. Diese entstehen durch Rekonfiguration, etwa von Positions- auf Kraftkommando, oder etwa durch Abschalten eines als defekt gemeldeten Motors durch das Redundanzmanagement des aktiven Sidesticks. Für diese Untersuchung werden die aktiven Sidesticks so konfiguriert, dass sie ihre Degradierungen (z.B. isometrischer = klemmender Stick, kraftfreier Stick) simulieren. Zur Überprüfung der Fliegbarkeit in worst-case-Szenarien werden Mission-Task-Elements (MTE) und Bewertungsschemata ausgewählt bzw. definiert:

- ➔ Simulation potentiell fliegbarer Degradierungsmodi am Stick,
- ➔ Definition der MTE und Bewertungsschemata,
- ➔ Optimierung auf Systemebene (Rekonfiguration) und
- ➔ Abschlussbewertung im Flugversuch (unter Beteiligung von AHD-Testpiloten).

Simulation potentiell fliegbarer Degradierungsmodi

Es ist leicht vorstellbar, dass der Totalausfall eines Primärsteuers während des Fluges katastrophale Folgen hat, wenn keine alternative Steuermöglichkeit gegeben ist. Das ist zu vermeiden. Ein

Weg besteht darin, stets alle Funktionen durch entsprechende Zuverlässigkeit der Subkomponenten zu gewährleisten. Das führt dazu, dass Komponenten mit geringer Zuverlässigkeit redundant ausgeführt werden müssen, um insgesamt auf die geforderte Zuverlässigkeit zu kommen. Dies hätte Auswirkungen auf das Gewicht und die Kosten. Eine Alternative besteht in der Rekonfiguration, bei der lediglich die Primärfunktion „Bereitstellung eines Steuersignals“ mit der geforderten Zuverlässigkeit gewährleistet wird, während Degradierungen in Komfort und erhöhte Arbeitsbelastung für die Zeit bis zur sicheren Landung hingenommen werden. Ein aktives Steuerorgan besitzt funktionsbedingt mehrere Sensoren, deren Signale zur Primärsteuerung für einen geregelten Hubschrauber verwendet werden könnten, siehe Abbildung II.1.14. Diese sind insbesondere: Positionssensoren, Kraftsensoren und Richtungsschalter am Griff. Prinzipiell wäre es also möglich, bei Fehlern in einzelnen Sensoren oder bei blockiertem Getriebe in Form einer Rekonfiguration auf eine realisierbare Konfiguration aus fehlerfreien Teilsystemen zur Steuerung zurück zu greifen. Dabei gilt die Annahme, dass es eine technische Lösung zur Detektion des Fehlers gibt, die jedoch nicht Bestandteil dieser Untersuchung ist.

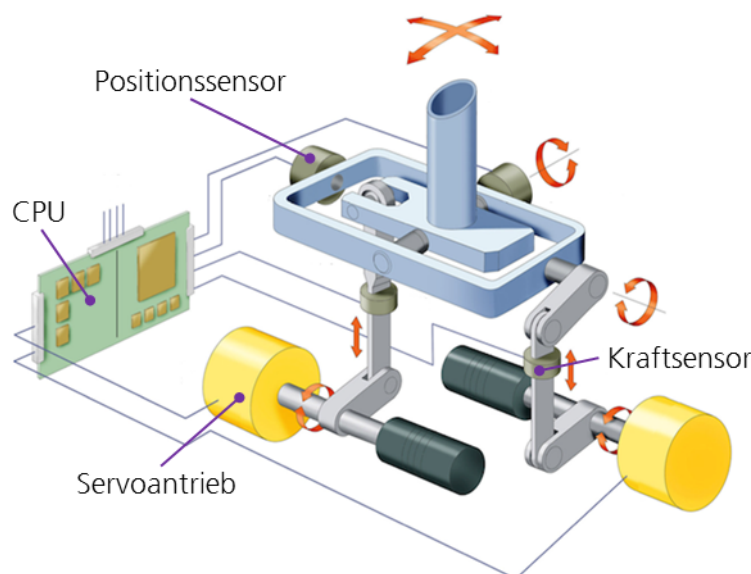


Abbildung II.1.14.: Schematischer Aufbau mit Komponenten eines aktiven Steuerorgans [26]

Die Bestimmung aller möglichen Fehlerfälle für ein aktives Steuerorgan erfordert eine tiefergehende technische Fehleranalyse, die nicht Thema dieses Arbeitspakets ist. Hier geht es um die Untersuchung der Fliegbarkeit plausibler Rekonfigurationen, unter der Annahme, dass es technisch möglich ist, dass verschiedene Fehlerfälle letztlich in diese konvergieren. So ist es z.B. technisch plausibel, bei einer plötzlich auftretenden, fehlerinduzierten Oszillation die Servoaktuatoren abzuschalten und in einen kraftfreien oder „isometrischen“ Modus zu wechseln. Im Fall eines blockierten Sticks könnte das Signal der Kraftsensoren genutzt werden. Nachfolgend sind beispielhaft einige mögliche Fehlerfälle samt möglicher Rekonfiguration aufgelistet:

- Isometrisches Steuer, Steuerung mit Kraftsignal; z.B. nach Blockieren des Servoantriebs, nach Ausfall des Positionssensors oder nach einem „Runaway“ an den Steueranschlag.
- Isotonisches Steuer, Steuerung mit Positionssignal; z.B. nach Abschalten des Servoantriebs bei einem Fehler oder nach Ausfall des Kraftsensors.

- ➔ Diskrete Steuerung über die Richtungsschalter am Griff nach Verlust der Kraft- und Positionssensoren (hier nicht untersucht).

Für die Untersuchung der genannten Fehlerfälle weisen aktive Steuerorgane den Vorteil auf, dass sich durch entsprechende Parameterwahl ein Fehlerfall simulieren lässt. Der isotonische Fehler, d.h. das Fehlen von rückstellenden oder bremsenden Kräften, lässt relativ einfach simulieren indem der Antrieb abgestellt wird, oder etwa bei Antrieben mit geringer Selbsthemmung die simulierte Federkennlinie zu Null und die Dämpfung herabgesetzt werden. Die Simulation des isometrischen Fehlers erfolgte zunächst durch eine Erhöhung der simulierten Reibung auf die Maximum von ca. 150 N. Dies macht ein Bewegen mit normalen Steuerkräften unmöglich und vermittelt so sehr gut den Eindruck eines blockierten Antriebs. Später wurde dies durch Setzen zweier begrenzender Hardstops pro Achse realisiert. Je nach Betriebszustand oder Fehlerfall entscheidet eine „Switch Logic“, ob Kraft oder Position als Steuersignal „Cmd“ von der Hubschrauberregelung „FCS“ verwendet werden, siehe Abbildung II.1.15. Dieses ist normalerweise die „Position“ des Steuergriffs und nach dem manuellen Auslösen des Fehlers die Steuerkraft, engl. „Force“. Zur Optimierung auf Systemebene wurde das Kraftsignal durch einen „Filter“ 2.Ordnung, d.h. mit einer ähnlichen Dynamik wie der korrekt arbeitende Sidestick gefiltert. Der Filter wurde so konfiguriert, dass er die im Moment des Fehlers gültigen Steuerpositionen und Steuergeschwindigkeiten übernimmt, um ein transientenfreies Ausgangssignal zur Verfügung zu stellen.

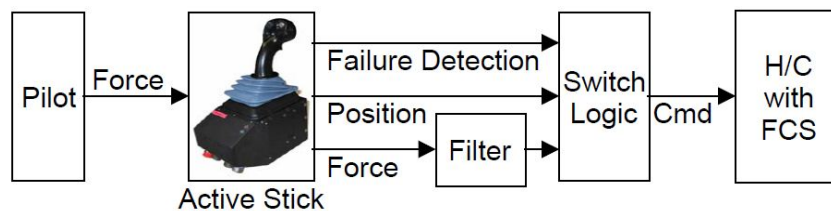


Abbildung II.1.15.: Signalfluss im Normalbetrieb und im Fehlermodus

Bewertungsschemata

Die Flugeigenschaften und Handling-Quality-Levels der Rekonfigurationen oder Backup-Modes lassen sich durch die klassischen Methoden, wie in der ADS-33E PRF beschrieben, experimentell ermitteln. Da ein Fehler jedoch plötzlich auftreten kann und damit sprungartige Veränderungen der Steuerbarkeit auftreten können, sind zusätzlich zur Bewertung der Handling-Qualities des Backup-Modes selbst auch Untersuchungen zur Handhabbarkeit der Fehlereffekte notwendig. Die sprungartige Veränderung kann z.B. zu einer veränderten Steuersensitivität führen. Diese können in Oszillationen (PIO) und eingeschränkter Kontrollierbarkeit oder sogar in temporärem Kontrollverlust resultieren. Speziell zur subjektiven Bewertung von plötzlich auftretenden Fehlern eignet sich das „Integrated Failure Evaluation Scheme“ (IFES). Dieses Interviewschema (Abbildung II.1.16) fragt ab, als wie schwerwiegend der Pilot den Transienten (transient) unmittelbar nach Auftreten des Fehlers empfunden hat und wie schwierig sich ihm die Wiedererlangung der Kontrolle (recovery) dargestellt hat. Die Skala geht von A bis H, wobei Bewertungen zwischen A und F als tolerierbar gelten. Es wurde in mehreren Evolutionsschritten in unterschiedlichen Organisationen entwickelt [27; 28] und letztlich von Padfield in die aktuelle Form gebracht [29]. Es bezieht auch die Flugeigenschaften im Fehler- oder Backup-Modus mit ein und dient daher der kombinierten, qualitativen Evaluation von Transient, Recovery und den stationären Flugeigenschaften zur Fortführung des Flugs.

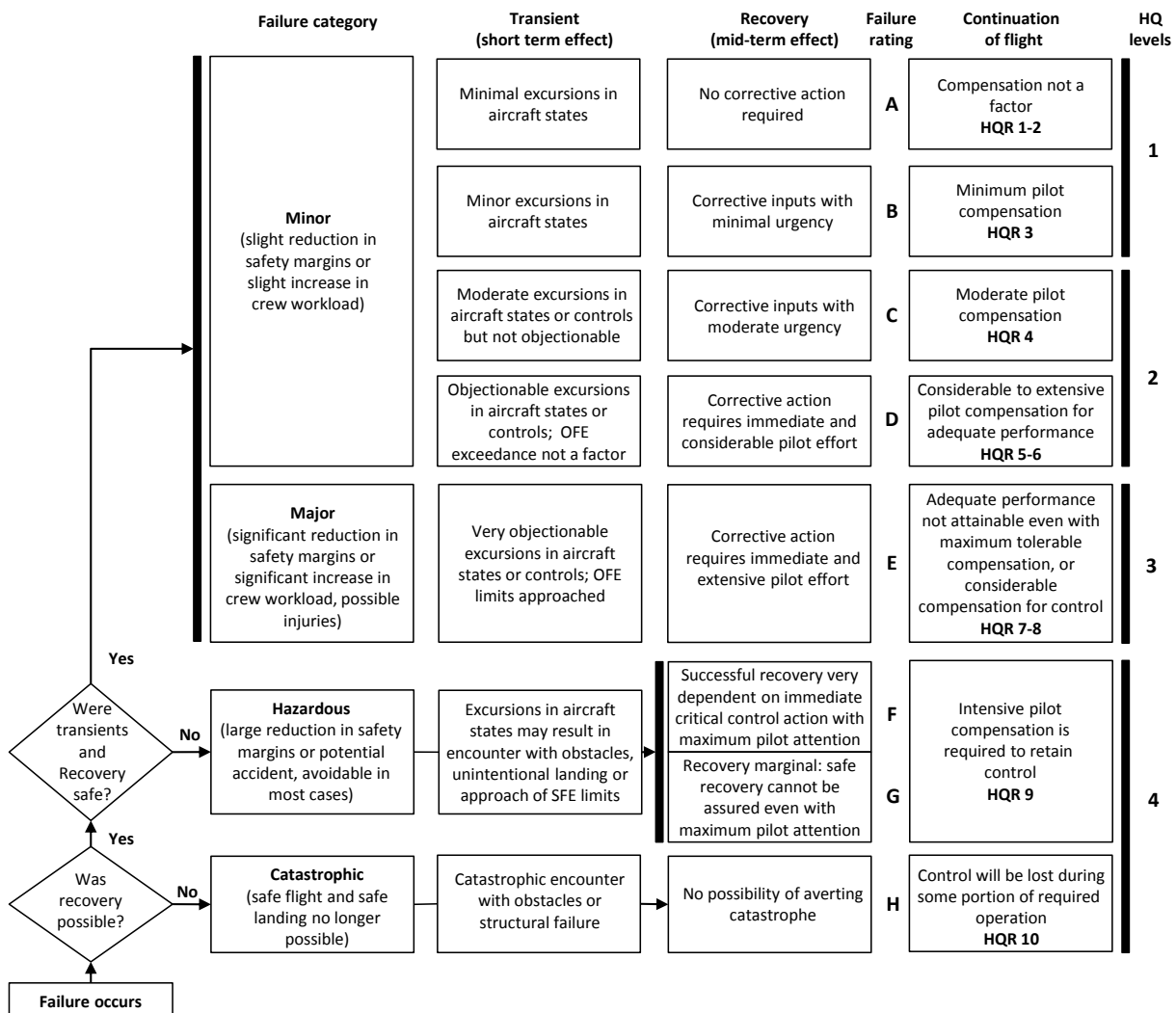


Abbildung II.1.16.: Integriertes Fehler-Evaluationsschema (IFES) nach Padfield [29]

Zur quantitativen Untersuchung der Fehlereffekte führt die ADS-33E PRF weitere Kriterien an (Tabelle II.1.2). Diese betrachten die auftretenden Beschleunigungen und Lageänderungen, die Einhaltung der operationellen Flugenveloppe (OFE) sowie die Zeitspanne, in welcher der Pilot oder die Pilotin nicht eingreifen muss. Diese quantitativen Kriterien ergänzen und objektivieren die qualitativen Kriterien, die ihrerseits stark durch die aktuelle Situation und aktuell empfundene Gefährdung geprägt sind und in Boden- oder Hindernisnähe anders ausfallen würden als in großer Höhe.

Simulatoruntersuchung für den isometrischen Fehlerfall (qualitativ)

Zur Untersuchung der Backup-Funktionalitäten aktiver Sidesticks müssen die Fehlerfälle zunächst simuliert werden um dann anhand geeigneter Manöver untersucht zu werden. Diese Untersuchung wurde in der ehemaligen Hubschrauber-Bodensimulation des DLR für den isometrischen Fehlerfall des rechten (zyklischen) Sidesticks durchgeführt.

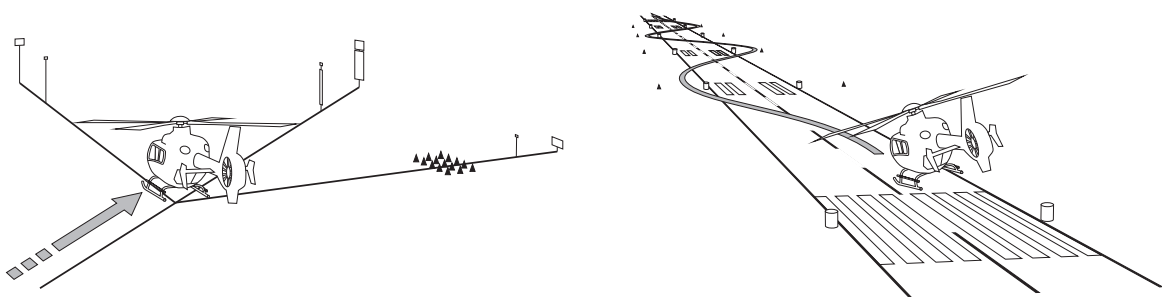
Zur experimentellen Überprüfung des Backupmodus wurden zwei Manöver bzw. Mission-Task-

Tabelle II.1.2.: Erlaubte Fehlertransienten nach ADS-33 [20]

Level	Flight condition *	
	Hover and low speed *	Forward up-and-away *
I	3 deg roll, pitch, yaw 0.05 g n_x , n_y , n_z . No recovery action for 3.0 s.	Stay within OFE. No recovery action for 10.0 s.
II	10 deg attitude change or 0.20 g acceleration. No recovery action for 3.0 s.	Stay within OFE. No recovery action for 5.0 s.
III	24 deg attitude change or 0.40 g acceleration. No recovery action for 3.0 s.	Stay within OFE. No recovery action for 3.0 s.

* For „near earth forward flight“ both „hover and low speed“ and „forward up-and-away“ requirements apply.

Elements (MTE) aus der ADS-33E PRF [20] ausgewählt: Hover-Task und Slalom-Task (siehe Abbildung II.1.17). Diese decken in Kombination verschiedene Kriterien ab, welche zur Überprüfung der Fähigkeit zu sicheren Landung oder sogar Fortführbarkeit des Fluges erforderlich sind. Die ADS-33E PRF definiert diese Manöver und gibt die Gütekriterien vor, welche eingehalten werden müssen, um erwünschte (desired) oder ausreichende (adequate) Flugeigenschaften nachzuweisen. So müssen bei der Hover-Task z.B. für eine bestimmte Zeit Höhe, Position und Ausrichtung gehalten werden, was der Pilot durch Sichtreferenzen in Form von Pylonen kontrollieren kann. Beim Slalom darf eine minimale Geschwindigkeit nicht unterschritten und eine maximale Höhe nicht überschritten werden. Für die Manöver stehen entsprechende virtuelle Parcours in der Simulation zur Verfügung.



(a) Hover

(b) Slalom

Abbildung II.1.17.: Flugaufgaben (MTEs, aus [30])

Mit diesen MTEs wurde eine Simulatorstudie mit zwei Piloten durchgeführt, wobei Pilot 1 zum Zeitpunkt der Studie ein Ingenieur mit Flächenfluglizenz und Hubschrauber-Simulatorerfahrung und Pilot 2 ein lizenzierter Hubschraubertestpilot war. Dabei wurden jeweils zwei verschiedene Reglermodi (upper modes), nämlich das Attitude Command (AC) und das Rate Command (RC) ge-

nutzt. Es wurden für jede Kombination aus Reglermodus und MTE jeweils drei Flüge mit folgenden Einstellungen oder Ereignissen zur Evaluation durchgeführt und jeweils anschließend ein Interview nach dem IFES vorgenommen (Abbildung II.1.16):

1. Flug ohne Fehler mit anschließendem Cooper-Harper-Rating, als Vergleich (benchmark).
2. Flug mit unangekündigter Fehlerauslösung durch einen Assistenten für die Bewertung des Fehlereffekts (short and mid term effects).
3. Flug mit bestehendem Fehler zur Bewertung der stationären Flugeigenschaften des Backup-Modes (continuation of flight).

Die verschiedenen Kombinationen und Konfigurationen aus Manöver, Reglermodus und Sidestick-status wurden von den Piloten vor dem eigentlichen Versuchsdurchlauf trainiert. Das Training umfasste jeweils zwei bis drei Durchläufe eines Manövers. Die Gesamtversuchsdauer pro Pilot betrug zwei Stunden, bei ca. einer Stunde reiner Flugzeit. Pilot 1 hat zudem vor dem Versuch noch eine Optimierung der Steuerkraftcharakteristik des Sticks und der Filtereigenschaften vorgenommen. Die gefundenen Einstellungen wurden für Pilot 2 übernommen.

Vor der Darstellung der numerischen Evaluationsergebnisse soll festgehalten werden, dass beim ersten Mal keiner der Piloten in der Lage war, die Manöver beim plötzlich auftretenden Backup-Modus sicher fortzuführen, was ihnen jedoch nach einigen Trainingsdurchläufen gelang. Die Ergebnisse der qualitativen Evaluation sind in der Abbildung II.1.18 links für Pilot 1 und rechts für Pilot 2 dargestellt. Die Skala der linken Hochachse zeigt das Cooper-Harper-Rating, welches im ersten und dritten Durchlauf vergeben wurde. Die Skala der rechten Hochachse zeigt das Rating des Fehlereffekt-Evaluations-Schemas, welches im zweiten Durchlauf vergeben wurde. Auf der Querachse sind die einzelnen Kombinationen aus Manöver und Reglermodus dargestellt. Jede Kombination wurde durch ein Tripel aus den oben beschriebenen Angaben bewertet. Es ist erkennbar, dass der Backup-Modus immer gleich oder etwas schlechter bewertet wurde, als der fehlerfreie Modus. Die Bewertung war dabei für beide Fälle immer im Bereich von Handling-Quality-Level I oder II. Der Fehlereffekt wurde nie schlechter als „D“ bewertet und liegt damit im tolerierbaren Bereich. Darüber hinaus haben die Piloten kommentiert, dass der Backup-Modus zwar fliegbar sei, aber nicht länger als eine halbe Stunde. Außerdem sei ein Trainingseffekt mit dem Fortschritt der Evaluation spürbar gewesen.

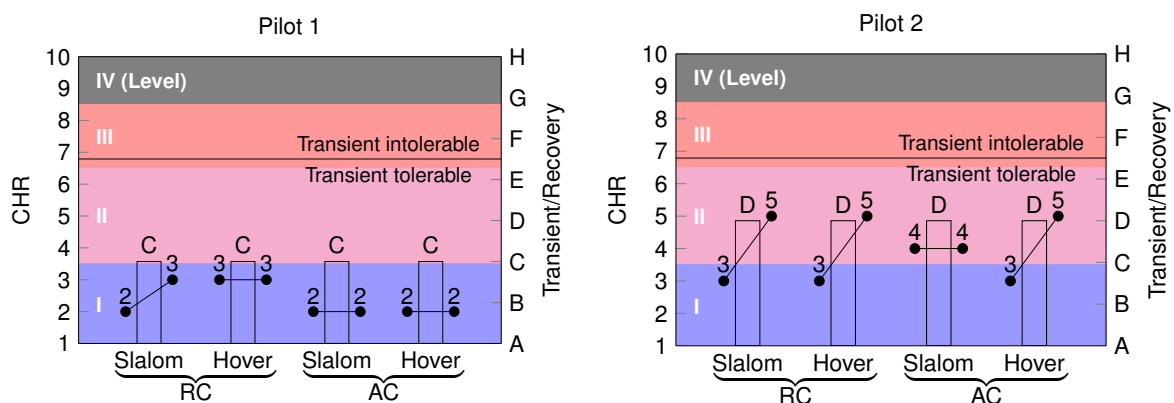


Abbildung II.1.18.: Qualitative Fehlerbewertung

Für die untersuchten Situationen zeigte sich, dass der isometrische Backup-Modus mit dem geregelten Hubschrauber nach Training fliegbar und der Fehlereffekt tolerierbar ist. Für eine generalisierte Aussage darüber, ob der hier untersuchte oder ein anderer Fehlerfall sicher beherrschbar sind, ist eine Betrachtung der schlimmsten Situation (worst-case), in welcher der Fehler auftreten kann, erforderlich. Idealerweise sollten später Flugversuche zur Untermauerung der Simulatorergebnisse stattfinden. Die oben genannte Untersuchung erfolgte zusammen mit dem Hubschrauberpiloten, der dazu eine Diplomarbeit [50] verfasst hat, die im Rahmen von SiRaSKoF-H betreut worden ist. Aus dieser Arbeit ist ein Konferenzpaper für das European-Rotorcraft-Forum im September 2012 hervor gegangen [40].

Flugversuche ACT/FHS

2013 wurde während der jährlich in Braunschweig stattfindenden Flugversuchskampagne der *Empire Test Pilot School (ETPS)* ein einstündiger Demonstrationsflug für die Degradierungen mit dem ACT/FHS von einem Test- und Lehrpiloten der ETPS durchgeführt. Im Anschluss wurde von diesem ein ausführlicher Post-Flight-Report verfasst [54]. Darin beschreibt er das transiente Verhalten des Hubschraubers bei der Degradierung und die angewandten Steuerstrategien zum Beherrschen des Transienten. Anschließend gibt er eine Einschätzung der Fliegbarkeit der demonstrierten Degradierungen ab. Dabei wird deutlich, dass die Auswirkungen der Degradierungen klar vom Flugzustand und dem Steuerausschlag im Moment der Degradierung abhängen. Dabei kam es zum Beispiel zu Problemen bei der Degradierung in den isometrischen Modus als der Stick ganz hinten ausgeschlagen war. Hier konnte der Stick zunächst nicht getrimmt werden, weil der Daumen den *Force-Trim-Release* Knopfs in dieser Position nicht erreichen konnte. Erst durch Übergreifen mit der linken Hand zum rechten Steuergriff konnte der Knopf betätigt und der Stick getrimmt werden. Insgesamt schätzte der Pilot die gezeigten Degradierungen bei den geflogenen Manövern als beherrschbar ein, solange die Ausschläge nicht zu groß sind. Er merkt aber an, dass untersucht werden müsse, ob für die Beherrschbarkeit dieser Degradierungen im Alltag zusätzlicher Trainingsaufwand erforderlich ist. In einem weiteren Dokument leitet er aus den im Flugversuch gesammelten Eindrücken Empfehlungen für die weitere Untersuchung der Degradierungen ab [55]. Dabei führt er an, dass für die weitere Untersuchung zunächst eine systematische Analyse der Einflussparameter zur Planung geeigneter *Worst-Case*-Szenarien stattfinden müsse. Dazu gibt er konkret an, welche Parameter neben den oben genannten, Steuerausschlag und Haltekraft, noch auf ihren Einfluss auf die Beherrschbarkeit der Degradierung untersucht werden sollten.

Vertiefende Untersuchung der Einflussfaktoren und Worst Case Manöver

Dazu wurden zusammen mit dem ETPS Testpiloten Ende 2013 weitere Untersuchungen im ehemaligen ACT/FHS-Systemsimulator durchgeführt, die nach dem Umzug in das EC-135 Cockpit des neuen AVES-Simulatorzentrums Anfang 2015 zuende geführt worden sind. Dabei ging es um die Identifikation der wichtigsten Einflussfaktoren zur Charakterisierung von Worst-Case-Szenarien im Zusammenhang mit einem plötzlich auftretenden Verlust der Motorkraft des aktiven Sidesticks. Dazu wurde z.B. gezielt der Steuerausschlag vor der Degradierung variiert und die Auswirkungen mit Hilfe der bereits in der Studie 2012 verwendeten IFES Skala untersucht. Es zeigte sich, dass der größte Einfluss auf die Auswirkungen einer Degradierung in der Höhe der Steuerkraft unmittelbar vor dem Auftreten der Degradierung liegen, siehe Abbildung II.1.19. Dort wurde die Pilotenbewertung gemäß IFES-Skala über der Steuerkraft im Moment des Fehlers aufgetragen. Die Erwartung

einer baldigen Degradierung wirkt sich mildernd auf die Schwere aus. Weniger gravierend, aber nicht zu vernachlässigen sind die Achse und die Richtung der Auslenkung, sowie der Flugzustand. Ferner sind gleichzeitige Auslenkungen in mehreren Achsen, sowie die Drehraten und der Grad an Aufmerksamkeit des Piloten als Einflussfaktoren zu nennen.

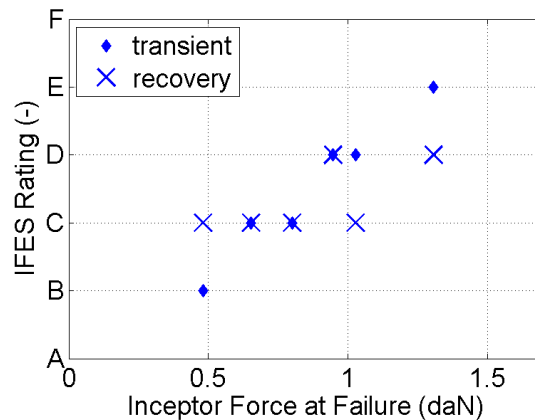


Abbildung II.1.19.: IFES Bewertung in Abhängigkeit von der Steuerkraft bei 60 KIAS

Auf Basis der oben genannten Ergebnisse hat der Testpilot eine Flugaufgabe zur Untersuchung der Fliegbarkeit von Degradierungsmodi der aktiven Sidesticks konzipiert. Diese kombiniert verschiedene Manöver, die im Falle einer Degradierung zu einer worst-case Situation führen. Dazu gehören Steilkreise, Kurvenwechsel und Nickwinkeländerungen, siehe Abbildung II.1.20 aus [56]. Die Flugaufgabe kommt ohne spezielle Bodenmarkierungen aus und kann mit Hilfe der an Bord zur Verfügung stehenden Standardinstrumente geflogen werden. Dabei nennt der Testpilot auch die Punkte, an denen das Auftreten einer Steuerdegradierung zur worst-case Situation führen würde. Durch die Anordnung der Manöver in einem Rundkurs, kann der Versuchspilot mehrere Runden fliegen, bevor der Fehler eingespielt wird. So kann er den Auslösezeitpunkt des eingespielten Fehlers nicht vorhersagen. Dies ist wichtig, da auch die Transition und Wiedererlangbarkeit der Kontrolle nach dem unerwartet auftretenden Fehler untersucht werden muss.

Die Identifikation der Haupteinflußparameter und der Entwurf des Evaluationszenarios sind im Detail in einem Konferenzbeitrag auf dem Forum der American Helicopter Society (AHS) 2015 vorgestellt worden [41]. Das Thema ist Gegenstand eines zum Berichtszeitpunkt laufenden Promotionsvorhabens.

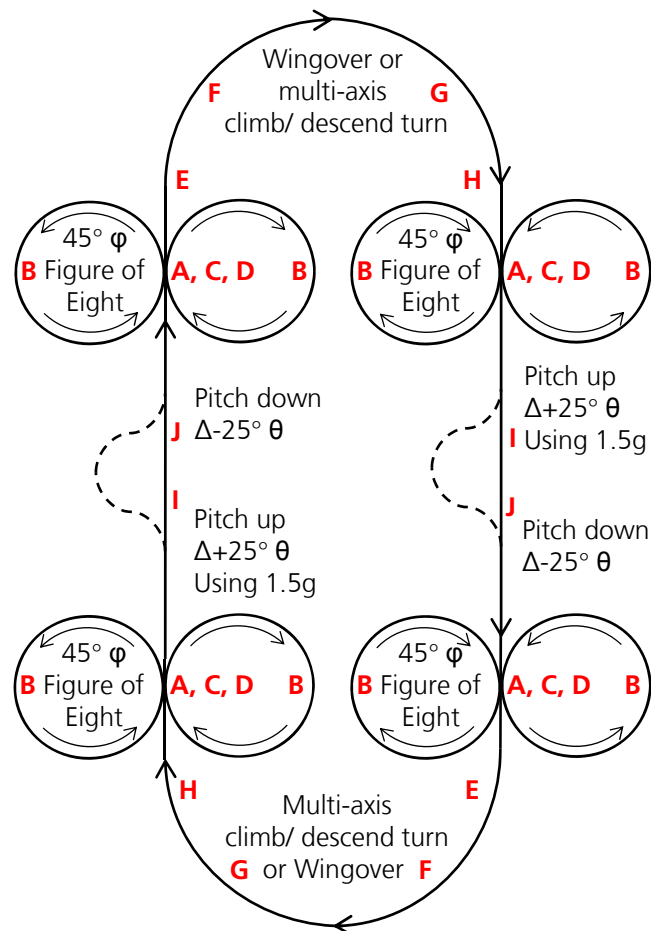


Abbildung II.1.20.: Flugaufgabe zur Evaluierung von Sidestick-Degradierungen [41]

AP 2.3. Dual Pilot Cockpit mit gekoppelten aktiven Sidesticks (elektronische Stange)

In HAP 2.3 steht die experimentelle Konzeptfindung für die Zusammenarbeit im Zwei-Piloten-Cockpit (Dual-Pilot-Coordination) mit aktiven Sticks im Vordergrund. Für den Einsatz von aktiven Steuerorganen im Zwei-Piloten-Cockpit (Dual-Pilot-Cockpit) sind viele Fragen ungeklärt, die bei der starren Verbindung über ein Gestänge im konventionellen Steuersystem nicht auftreten. Bei aktiven Steuerorganen erfolgt die Synchronisation elektronisch. Damit lassen sich die Steuerkräfte an den beiden Steuern unterschiedlich einstellen, um dadurch etwa eine Bevorzugung eines der Piloten zu erreichen (Pilot-flying vs. Pilot-non-flying). Die im vorangegangenen AP 2.2 durchgeführte Degradierungsanalyse berücksichtigte nur einen Piloten, im Dual-Pilot-Cockpit ergeben sich weiterführende Fragen: Was passiert mit dem anderen Steuer, wenn ein Steuer ausfällt? Wie erfolgt die Übergabe? Zur Durchführung der Untersuchungen im letzten Drittel des Projektzeitraums wird nach erfolgter Konzeption und einem mit dem Projektträger durchzuführendes Midterm-Review ein Dual-Pilot-Cockpit-Demonstrator aufgebaut. Das Review soll die Nachhaltigkeit der gesetzten Ziele beurteilen und als Ergebnis die Freigabe der Mittel für die Hardwareinvestitionen darstellen. Für die zu beschaffende bzw. zu erstellende Infrastruktur wird ein bereits vorhandener einsitziger Sidestick-Labor-Demonstrator zu einem zweisitzigen Dual-Pilot-Demonstrator erweitert. In diesen Demonstrator werden zwei Pilotenarbeitsplätze integriert, die jeweils mit zwei geeigneten aktiven Sidesticks ausgerüstet werden sollen. Nach Möglichkeit sollen deshalb vier aktive Sidesticks von AHD, des innerhalb des LuFo IV Projekts Aristokat entwickelten Typs, durch das DLR beschafft und genutzt werden.¹

AP 2.3.1. Bereitstellung der Infrastruktur Sidestick Demonstrator

In diesem AP wird die benötigte Hardware spezifiziert, beschafft und aufgebaut, sowie in die am DLR existierende Hard- und Softwareinfrastruktur integriert:

- Spezifikation der benötigten Infrastruktur (Hardware, Software),
- Beschaffung der Hardware,
- Erweiterung des Sidestick-Demonstrators und Integration der aktiven Sidesticks,
- Softwareanbindung und
- Inbetriebnahme und Funktionstest.

Hardware: Spezifikation, Beschaffung und Aufbau

Zu Beginn wurde eine Spezifikation des Dual-Pilot-Active-Sidestick-Demonstrators (2PASD) erstellt [57]. Diese gibt neben den Anforderungen zusätzlich einen Überblick über den Verwendungszweck des Demonstrators, die benötigten Komponenten und Baugruppen sowie eine grobe Abschätzung der anfallenden Beschaffungskosten. Das neue System sollte auf der Grundlage eines

¹Die aktiven Sidesticks von AHD konnten nicht beschafft werden. Stattdessen wurden gemäß Alternativplan aktive Sidesticks eines anderen Herstellers beschafft, siehe Abschnitt [Hardware: Spezifikation, Beschaffung und Aufbau](#).

bereits am Institut für Flugsystemtechnik existierenden einsitzigen Sidestick-Demonstrators aufgebaut werden. Mit Hilfe des Programmes CATIA fand eine erste Visualisierung der grundsätzlich erforderlichen Konfigurationsmöglichkeiten des Demonstrators statt, wobei auch die Integrationsfähigkeit des Systems bezüglich der am Standort existierenden bzw. zukünftigen Simulatorplattformen berücksichtigt wurde. Abbildung II.1.21 zeigt schematisch drei spezifizierte Konfigurationen: Als Dual-Sidestick-Demonstrator in „side-by-side“-Anordnung, als „Theatersystem“ und in einem Projektions-Dome.

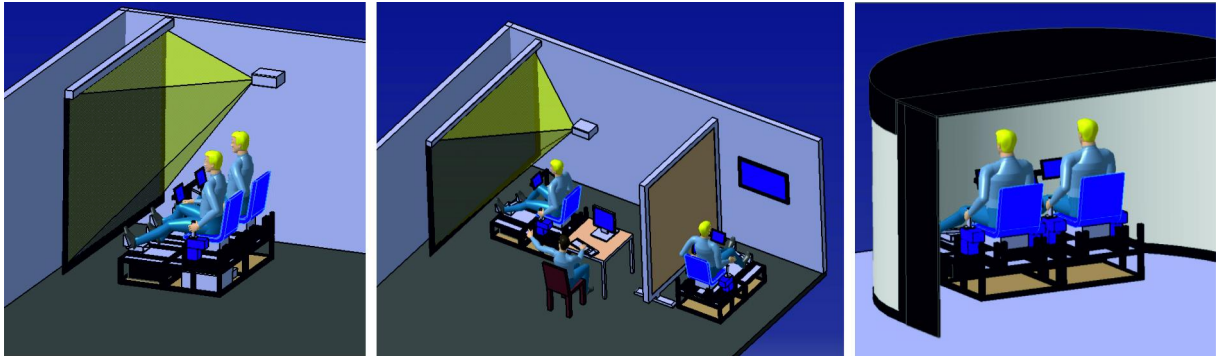


Abbildung II.1.21.: Modulares Konzept des Cockpit-Demonstrators (1: Side-by-Side im Labor, 2: Theatersystem-Anordnung, 3: Side-by-Side im Dome der ACT/FHS-Systemsimulation)

Im Einzelnen wurden die folgenden Aufgaben und Funktionen des Systems spezifiziert:

- Durchführung der in AP 2.3.2 „Regeln und Übergabestrategien für gekoppelte aktive Sidesticks“ vorgesehenen Untersuchungen. Diese beziehen sich insbesondere auf
 - die Priorisierung des kommandierenden Piloten (engl. *pilot-in-command*) durch unterschiedliche Krafteinstellungen,
 - die Steuerübergabe im Normal- und im Fehlerfall,
 - die Auswirkung von haptischer Pilotenunterstützung bei gekoppelten Steuern,
 - sowie Sicherheitsuntersuchungen vor dem Hintergrund von Degradierungen mit den in AP 2.2 identifizierten Backup-Funktionalitäten.
- Entwicklung haptischer Assistenzfunktionen.
- Simulation von Automation im "Theatersystem"[31]. Hier werden die Kraftmuster manuell und verdeckt durch einen versteckten menschlichen Operator an einem Sidestick erzeugt und einem Probanden an dem anderen elektronisch gekoppelten Sidestick "vorgespielt". So können verschiedene Ideen schnell und ohne vorherige Implementierung in Software unkompliziert ausprobiert werden.

Optional sind auch die folgenden, weiterführenden Anwendungen denkbar:

- Modifikation und Erweiterung für die Untersuchung neuartiger Cockpitkonzepte für die Hubschraubersteuerung und Pilotenassistenz (z.B. Lenkradsteuerung, visuelle Gestenerkennung, intuitive Regelung).

- Verwendung als mobile Technologie-Demonstration auf internen und externen Ausstellungen, Messen und Kongressen und Durchführung von Studien an anderen Standorten.

Nachfolgend ist die Spezifikation und Beschaffung der einzelnen Komponenten beschrieben.

Sidesticks Wie bereits vorher beschrieben, konnte AHD den innerhalb des Projektes SiRaSKoF-H hergestellten aktive Sidestick nicht wie ursprünglich geplant zur Verwendung im 2PASD liefern. Daher wurde das Steuerkraftsystem aus zwei Paaren gekoppelter, aktiver Sidesticks einschließlich Steuerelektronik gemäß Alternativplanung extern beschafft. Zu diesem Zweck wurde eine Spezifikation als Grundlage für eine Ausschreibung erstellt [58]. Bei der Spezifikation wurde vor allem dem Bedarf an unabhängig voneinander konfigurierbaren aktiven Sidestick-Einheiten mit schneller und exakt beschriebener Dynamik Rechnung getragen. Besonderes Augenmerk wurde darauf gelegt, dass sich die Basis-Dynamik des Sidesticks mittels Referenzmodell durch den Anwender selbst und mit vertretbarem Aufwand modifiziert werden kann. Es wurden zwei unabhängige Angebote der Firmen Wittenstein aerospace & simulation GmbH (WA&S) in Igersheim sowie Stirling Dynamics Ltd. in Bristol (UK) abgegeben. WA&S hat den Zuschlag bekommen und die Bestellung wurde im Dezember 2013 ausgelöst. Die Abbildung II.1.22 zeigt den aktiven Sidestick von WA&S. Das Steuerkraftsystem aus zwei Paaren gekoppelter, aktiver Sidesticks samt Steuerungselektronik (SCM) wurde im Juli 2014 geliefert. Die aktiven Sidesticks wurden 2015 im Rahmen einer Diplomarbeit statisch und dynamisch kalibriert [51]. Die Kalibrierung ist erforderlich, damit die mit 2PASD ermittelten Ergebnisse auf die aktiven Sidesticks im ACT/FHS und im AVES-Simulatorcockpit übertragen werden können und damit die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen anderer Forschungseinrichtungen gegeben ist.

Griffe Die Sidesticks sollten mit leichten Griffen ausgerüstet werden, die zudem kompatibel zu den im ACT/FHS verwendeten Griffen sind. Dies betrifft die Griff-Form und die Schalter, aber auch die Montierbarkeit auf den Sidesticks. Dies haben wir in einer Spezifikation definiert [59]. Die Firma Crouzet GmbH lieferte originale EC135 Griffe, welche auch für den rechtsseitigen Sidestick für die zyklischen Funktionen im ACT/FHS verwendet werden. Bei den erworbenen Griffen handelt es sich bereits um eine Weiterentwicklung aus leichterem Kunststoff gegenüber der Vorgängerversion aus Aluminium. Die Griffe für die linkshändigen Sidesticks wurden von der Firma BeJu Technik hergestellt. BeJu hatte diese Griffe bereits für den linken Sidestick im ACT/FHS hergestellt und



Abbildung II.1.22.: Sidestick-Servoeinheit der Firma Wittenstein aerospace & simulation GmbH

konnte nun eine besonders leichte Variante für den WA&S-Sidestick produzieren. BeJu hat zudem die rechtshändigen EC135 Griffe von Crouzet so modifiziert und mit einem Adapter ausgerüstet, dass sie sich auf den Sidesticks von WA&S montieren lassen.

Pedale Zur Vervollständigung des Systems wurden zwei Einheiten aktiver Pedale bei WA&S aus Eigenmitteln beschafft. Diese konnten an den Regelungs-Rechner (SCM) des Steuerkraftsystems aus zwei Paaren gekoppelter, aktiver Sidesticks von WA&S angeschlossen werden. Nachfolgend wird das Gesamtsystem aus aktiven Sidesticks und aktiven Pedalen zusammenfassend als „Control Loading System“ (CLS) bezeichnet.

Plattform Zur Planung der modularen Plattform von 2PASD wurde eine Spezifikation erstellt [60]. Diese beinhaltet Funktionen und Maße der benötigten Plattform. Sie sollte neben den aktiven Sidesticks auch Pedale, Hubschraubersitze und Monitore für die Instrumentendarstellung aufnehmen. Dabei sollen die Komponenten auch gegeneinander verstellt werden können. Zudem musste es möglich sein, die Teilmodule durch normale Zimmertüren mit 80 cm Breite zu bewegen. Idealerweise sollten zudem die Komponenten des alten Single-Pilot-Sidestick-Demonstrator-Cockpits weiter verwendet werden. Die Plattform für das 2PASD-Cockpit wurde gemäß Spezifikation des DLR [60] von der Firma Handke-Industrietechnik GmbH aus Aluminium Profilen aus dem Bosch-Rexrodt System gefertigt. Handke hatte bereits die Plattform des alten Sidestick-Demonstrator-Cockpits hergestellt und konnte die alten Module modifizieren und integrieren. Die Plattform wurde anschließend im Labor aufgebaut. Es konnten alle Sidesticks, Pedale, Sitze und Monitore eingerüstet werden.

Sichtsystem Als Sichtsystem dient ein Verbund aus fünf nebeneinander angeordneten großen Flachbildschirmen (55" Diagonale) anstelle von Projektoren und Leinwänden. Der Strahlengang eines normalen Projektors erfordert eine hohe Distanz zur Leinwand und im Zusammenhang mit einem Hubschraubercockpit idealerweise eine Anordnung für eine Rückprojektion. Die Räumlichkeiten bieten diesen Platz jedoch nicht. Kurzstanzprojektoren sind dagegen teuer. Flachbildschirme benötigen weniger Raum, außerdem bieten sie eine höhere Flexibilität für den mobilen Einsatz und können aufgeteilt werden, wenn beide Cockpits getrennt genutzt werden sollen. Die Abbildung II.1.23 zeigt die Planung der Anordnung der Bildschirme relativ zum Cockpit in einer Drei-Seiten-Ansicht. Die Teilabbildung unten rechts repräsentiert das Sichtfeld des Piloten auf dem rechten Sitz als Projektion der Sichtwinkel in vertikaler und horizontaler Richtung auf die Ebene (Hammer-Aitov-Projektion). Diese Darstellung ist analog zur Darstellung der Längen und Breitengrade auf einer Weltkarte. Man erkennt unter welchen Sichtwinkeln der Pilot die Bildschirme des Sichtsystems (hellblau), sowie die Monitore für die Instrumentendarstellung (türkis) und die Bodenplatte des Cockpits sehen würde. Der mittlere Bildschirm ist im Querformat ausgerichtet. Die äußeren Monitore sind im Hochformat ausgerichtet und können wie Flügel seitlich an das Cockpit herangeklappt werden. Dadurch wird der darstellbare Sichtbereich gegenüber einer rein frontalen Ausrichtung erhöht. Zur Aufnahme der Bildschirme wurde ein Gestell aus Bosch-Rexroth-Elementen konstruiert und aufgebaut, siehe Abbildung II.1.24. Darin sind die Bildschirme in der Höhe und im Abstand zum Cockpit verstellbar. Der Anklapp-Winkel der hochkant ausgerichteten Bildschirme lässt sich durch Scharniere stufenlos verstellen.

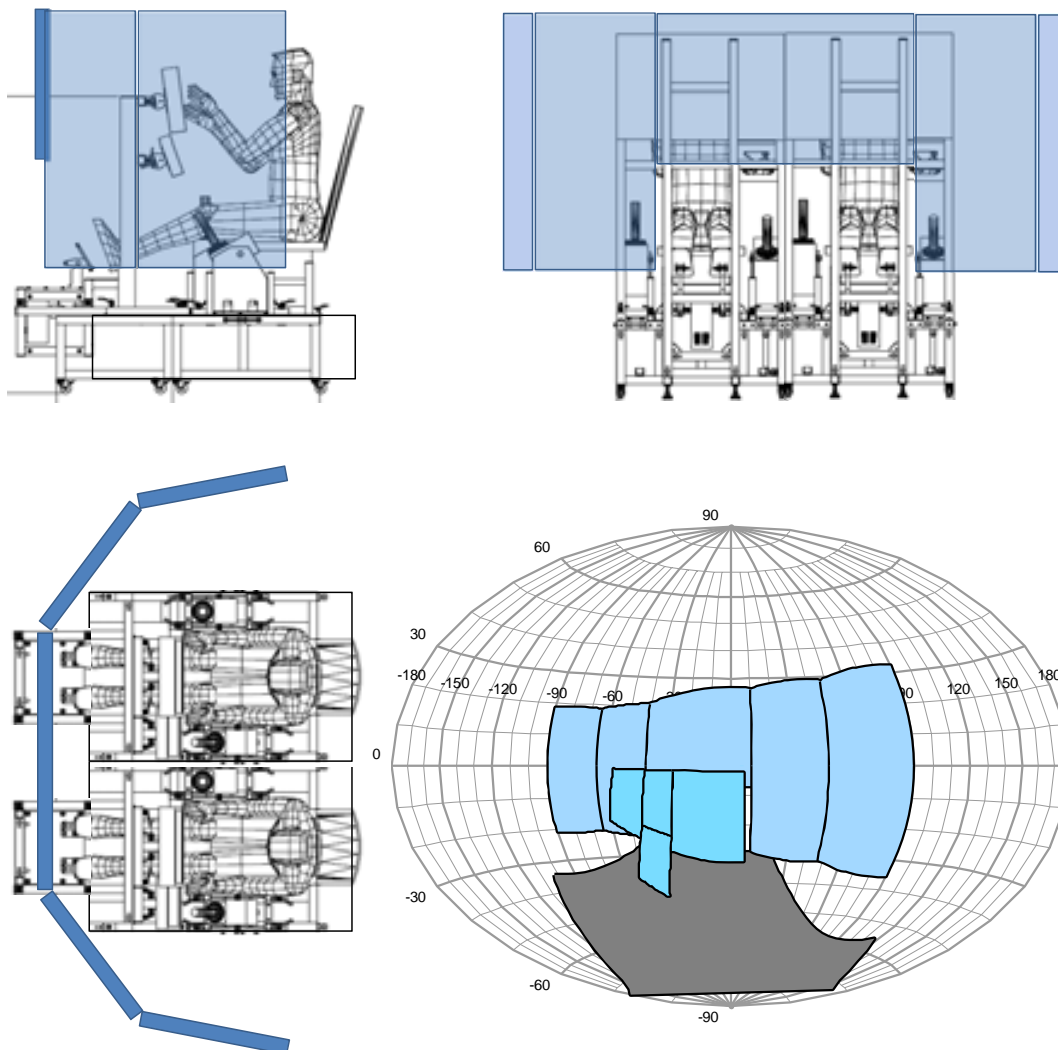


Abbildung II.1.23.: Planung 2PASD-Sichtsystem: Drei-Seiten-Ansicht und Sichtfeld des rechten Piloten: Aussensicht (hellblau) mit horizontal: $\pm 90^\circ$, vertikal: $-/+20^\circ$ (links) bis $\pm 32^\circ$ (rechts), Instrumente (türkis) und Bodenplatte (grau)

Simulations- und Grafikrechner Für die Simulation wurde ein Rechnernetz aufgebaut, der aus einem Simulations- und Interfacerechner mit dem Echtzeitbetriebssystem QNX, zwei Grafikrechnern mit leistungsfähigen Grafikkarten für die Außensicht- und die Instrumentendarstellung und einem Windows-Entwicklungsrechner besteht. Dieser Verbund kommuniziert mit dem Regelungs-Rechner (SCM) des WA&S-CLS. Die Gesamtarchitektur entspricht im Wesentlichen der Architektur des AVES-Simulators, wodurch die Softwaremodule von AVES und 2PASD kompatibel sind.

Software

Den Kern der Simulation bildet das hauseigene Simulations-Software-Framework *2Simulate*, welches die Schnittstelle zwischen den verschiedenen Softwaremodulen und Hardwarekomponenten darstellt. *2Simulate* ermöglicht es, während der Laufzeit die Variablen der implementierten Soft-

ware, etwa des Simulationsmodells oder der Ansteuerungssoftware für die aktiven Sidesticks, einzusehen und zu verändern. Als Simulationsmodell wurde das Simulink-basierte Kommandomodell (CM) implementiert. Das CM ist ein Referenzmodell für die modellbasierte Hubschrauberregelung des ACT/FHS, welches in dem LuFo-IV Projekt *HC-FBx* und dem DLR-internen Projekt ALLFlight entwickelt worden ist. Dieses wird hier alleinstehend als konzeptionelle Simulation mit idealen Flugeigenschaften genutzt. Die AVES-Sichtsimulation wurde auf die Grafikrechner portiert und so eingestellt, dass sie von der 2PASD-Software angesprochen werden kann. Das SCM wurde so in das Netzwerk eingebunden, dass es sowohl vom Entwicklungsrechner mit der WA&S-Software *AktivToolkit* als auch vom QNX-Rechner aus angesprochen werden kann. Die Ansteuerung des CLS geschieht zukünftig durch das ACS-Modul. Dieses ist Teil des ACT/FHS Experimentalsystems und dient dort der Ansteuerung der Sidesticks. In diesem Modul sind die haptischen Assistenzfunktionen implementiert, u.a. der Haptic-FLI und die Haptic-Obstacle-Avoidance. Derzeit wird eine Zwischenschicht definiert, welche das ACS-Modul aufnimmt und die Ausgangssignale für das WA&S-CLS transformiert. Die Software und ihre Bedienung wurde dokumentiert [61].

Fertigstellung und Inbetriebnahme

Der Labor Demonstrator für ein Zwei-Piloten Cockpit mit gekoppelten aktiven Sidesticks (2PASD) wurde fertig gestellt. Im Dezember 2015 wurde die Simulation mit „Pilot-in-the-Loop“ getestet. Dabei wurde das Kommandomodell durch die aktiven Sidesticks gesteuert und dessen Bewegung auf dem Außensichtmonitor angezeigt.



(a) frontal mit Bedienstand

(b) seitlich

Abbildung II.1.24.: Fertig gestellter 2PASD

AP 2.3.2. Regeln und Übergabestrategien für gekoppelte aktive Sidesticks

Im wissenschaftlichen Teil des HAP 2.3 erfolgt die Untersuchung der Dual-Pilot-Coordination mit aktiven Sidesticks:

- Strategieentwicklung Steuer-, bzw. Piloten-Priorisierung,
- Strategieentwicklung Kontrollübernahme im Fehlerfall,
- Definition der MTE und Bewertungsschemen und
- Abschlussbewertung im Sidestick-Demonstrator (unter Beteiligung von AHD Testpiloten).

Dieses Arbeitspaket wurde aus SiRaSKoF-H gestrichen. Die Aufgabe wird jedoch im Rahmen einer Dissertation bearbeitet, siehe Abschnitt [II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit](#) (S. 55).

II.2. Erläuterung des zahlenmäßigen Nachweises

Im Projektverlauf sind Kosten für Personal, Reisen, innerbetriebliche Leistungen und Material aufgelaufen. Dabei wurden die vom Projektträger genehmigten vorkalkulierten Kosten in keiner Kostenart überschritten.

Die Personalkosten sind zur Bearbeitung der im Projektplan beschriebenen Arbeiten aufgelaufen.

Die Reisekosten entfielen auf Dienstreisen zum Projektpartner AHD (zunächst Ottobrunn, später Donauwörth) und für die Reisen zu den Sidestick-Hersteller Stirling Dynamics in Bristol (UK) und Wittenstein aerospacesimulation in Igersheim an.

Die innerbetrieblichen Leistungen beziehen sich im Wesentlichen auf die Nutzung des AVES-Simulatorzentrums, sowie des ACT/FHS-Forschungshubschraubers.

Die Kosten für Material ergeben sich aus dem Arbeitspaket [AP 2.3.1. Bereitstellung der Infrastruktur Sidestick Demonstrator](#) (S. 48). Die größte Position Sidesticks inklusive Hard- und Software sowie Training und Einrichtung (Tuning) bezieht sich auf das System aus vier Einheiten paarweise gekoppelter aktiver Sidesticks, sowie der erforderlichen Modifikation der Treibersoftware und des Vor-Ort-Trainings durch den Hersteller WA&S.

II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Es wurde Arbeit in den drei Arbeitspaketen „[AP 2.1. Tactile Cueing](#)“, „[AP 2.2. Sidestick Hardware Degradierungsaspekte](#)“ und „[AP 2.3. Dual Pilot Cockpit mit gekoppelten aktiven Sidesticks \(elektronische Stange\)](#)“ geleistet. Die geleisteten Arbeiten waren notwendig zur Erreichung der dargestellten Ergebnisse. Insbesondere die Bearbeitung von [AP 2.3.1. Bereitstellung der Infrastruktur Sidestick Demonstrator](#), d.h. der Aufbau von 2PASD, war aufwändiger als ursprünglich geplant und konnte nur durch das Hinzuziehen eigener Ressourcen fertig gestellt werden.

II.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Als Forschungseinrichtung liegt die Verwertungsperspektive des DLR im Bereich der akademischen Verwertung durch wissenschaftliche Veröffentlichungen und universitärer Lehre durch die Betreuung studentischer Arbeiten und Promotionen. Ferner liegt sie im Bereich der Akquise weiterer

Forschungsaufträge.

Die Arbeiten und Ergebnisse aus dem Projekt SiRaSKoF-H sind bereits zu einem großen Teil in Form von Veröffentlichungen verwertet worden, bzw. werden aktuell verwertet. Es wurden vier Konferenzbeiträge veröffentlicht, zwei weitere Konferenzbeiträge sind zum Zeitpunkt der Berichterstellung in Veröffentlichung, siehe Abschnitt [II.6.1 Eigene Veröffentlichungen](#) (S. 59). Außerdem wurden neun studentische Arbeiten im Rahmen der universitären Ausbildung betreut, siehe [II.6.2 Studentische Arbeiten](#) (S. 59). Die Diplomarbeit zur Haptic-Obstacle-Avoidance [46] wurde mit dem Karl-Doetsch-Preis des Niedersächsischen Forschungszentrums für Luftfahrt (NFL) ausgezeichnet. Darüber hinaus konnten durch das Projekt SiRaSKoF-H zwei Dissertationsthemen generiert werden. Ein Promovierender konnte damit als unabhängig finanzierter Stipendiat am DLR gewonnen werden. Er beschäftigt sich mit dem Themengebiet [AP 2.3.2. Regeln und Übergabestrategien für gekoppelte aktive Sidesticks](#) und endet voraussichtlich Ende 2018. Dabei wird der im Projekt für diesen Zweck erstellte 2PASD weiter genutzt. Das Themengebiet „Sidestick Hardware Degradierungsaspekte“ aus AP 2.2 wird in einer weiteren Dissertation, die an den Ergebnisstand von SiRaSKoF-H anknüpft, weiter bearbeitet.

Jeweils im Herbst 2014 und 2015 wurde der AVES-Simulator zur Ausbildung von Testpilotenschülern der Empire Test Pilots' School (ETPS) genutzt. Die Aufgabe der Schüler bestand darin, Flugregler für die Verwendung mit einem isometrischen, d.h. blockiertem Steuer zu optimieren. Dabei wurde die in SiRaSKoF-H geschaffene Versuchsumgebung mit Sidestick-Fehlersimulation genutzt.

Die erzielten Ergebnisse, die erstellte Software und das im Projekt aufgebaute 2PASD-Labor haben die Wettbewerbsposition des DLR verbessert. Es konnten erfolgreich Anschlussprojekte akquiriert werden, in welche die Ergebnisse aus SiRaSKoF-H unmittelbar einfließen, darunter sind das LuFo-V Verbundprojekt SISTEB und das Projekt PA ATR des BAAINBw. Die Ergebnisse werden zudem im internen DLR Projekt ALL-In-Flight weiter genutzt und weiter entwickelt.

II.5. Relevante Ergebnisse Dritter

Tactile Cueing bei Boeing Helicopters

Auf dem Forum der American Helicopter Society 2013 wurde das von der US-Regierung finanzierte Forschungsprojekt „AVMS Phase I“ vorgestellt, welches die Relevanz der Themen Tactile-Cueing und Haptic-Obstacle-Avoidance für ein modernes Hubschrauber Avionik Systems betont [32]. Die Autoren des Papers stammen allesamt von *The Boeing Company*. Sie präsentieren die Ergebnisse der ersten Entwicklungsphase eines so genannten *Adaptive Vehicle Management Systems (AVMS)*. Dieses hat das Ziel, Technologien und Funktionen zu integrieren, welche die Verfügbarkeit von Hubschraubern erhöhen, d.h. den Flug bei anomalen und widrigen Bedingungen zu ermöglichen und die zur Verfügung stehende Flugleistung besser zu nutzen. Dies überschneidet sich mit den übergeordneten Zielen von SiRaSKoF-H. Das Paper stellt zuerst die Ergebnisse einer Sammlung und Priorisierung von Technologien und Funktionen vor, die von „mehreren Experten“ für das AVMS vorausgesetzt werden, ähnlich wie in AP 2.1 des SiRaSKoF-H-Projekts. Dabei werden nicht nur

Funktionen für das *Tactile Cueing* berücksichtigt, sondern auch andere Technologien. Den aktiven Steuerorganen wird dabei die höchste Priorität in der Liste der vorausgesetzten Technologien gegeben. Auch die Technologie „*Obstacle/Terrain Detection & State Estimation*“ wird dort als relevant aufgelistet. Als relevant werden explizit jene Funktionen erwähnt, die schon aus dem vorhergehenden Projekt *Helicopter Active Control Technology (HACT)* bekannt sind [7]. Dabei wird explizit die Verwendung von *Tactile Cueing* für die Einhaltung von System-Limitierungen, eng. *Envelope Protection*, mittels aktiver Steuerorgane genannt. Zudem wird der Prototyp eines so genannten *Active Parallel Actuators* der Firma *BAE Systems* zur nachträglichen Einrüstung in das Hubschraubermuster CH-47 vorgestellt. Dies ist ein elektrisches Steuerkraftsystem, welches in das vorhandene Steuergestänge integriert wird und so *Tactile Cueing* ermöglichen soll. Dieser Prototyp wurde im Simulator von Piloten getestet und die zu behebenden Schwachstellen aufgezeigt. Desweiteren werden beispielhaft Ergebnisse einer pilotierten Simulation für die *Tactile Cueing*-Funktionen zur *Torque-Protection* und *Obstacle -Avoidance* gezeigt. Diese Informationen zeigen damit sehr deutlich den Entwicklungsstand und die Relevanz der aktiven Steuerorgane für moderne Hubschrauber auf amerikanischer Seite und bestätigen die Auswahl der in SiRaSKoF-H bearbeiteten Themen.

Neue Norm für aktive Steuerorgane

Die amerikanische Standardisierungs-Organisation *SAE International* hat 2013 zusammen mit der Firma *BAE Systems* eine so genannte *Aerospace Recommended Practice (ARP)*, zu deutsch „empfehlende Richtlinie“, für aktive Steuerorgane veröffentlicht [33]. Dieses 52-seitige Dokument richtet sich an Hersteller und Nutzer aktiver Steuerorgane. Es deklariert Begriffe und Parameter zur Beschreibung der Eigenschaften und Leistung der Hard- und Software von aktiven Steuerorganen. Weiterhin werden auch die Anforderungen an die Zuverlässigkeit und sogar konkrete Empfehlungen für die Backup-Eigenschaften bei Degradierung gegeben. Diese Informationen werden im AP 2.2 *Sidestick Hardware Degradierungsaspekte* berücksichtigt.

DLR Untersuchung zur optimalen dynamischen Steuerkraftcharakteristik von Sidesticks

2013 wurde im Rahmen des DLR-internen Vorhabens SMART eine Untersuchung zur Beeinflussung der Flugeigenschaften des geregelten Hubschraubers durch die Anpassung der dynamischen Eigenschaften der aktiven Sidesticks fortgesetzt. Dazu wurde eine zweiwöchige Flugversuchskampagne mit dem ACT/FHS in Braunschweig durchgeführt. Dabei ergaben sich Erkenntnisse, welche eine vorab aufgestellt Hypothese zur Idealdynamik aktiver Sidesticks stützen. Es wurde in vorherigen Untersuchungen bereits postuliert, dass die ideale Steuerdynamik für einen Flugregler mit Attitude-Command nicht wie der aktuelle Standard 2. Ordnung sei, sondern 1. Ordnung. Ein System 2. Ordnung enthält die mechanischen Elemente Feder, Dämpfer und Masse, ein System 1. Ordnung ist dagegen massfrei. Der im ACT/FHS verwendete Stirling Sidestick simuliert ein System 2. Ordnung. Während der Flugversuche wurden aber jene Sidestickkonfigurationen besser bewertet, deren simulierte bzw. gefühlte Masse niedrig war, d.h. die dem System 1. Ordnung nahe kamen. Es zeigte sich aber auch, dass das verwendete System dabei an seine Grenzen kam. Eine vollständige Realisierung dieses Verhaltens ist zwar physikalisch unmöglich, da jeder Körper eine Masse besitzt. Jedoch sollten zukünftige Systeme so gestaltet werden, dass sie sich diesem

Verhalten noch weiter annähern. Diese Erkenntnis sollte bei der Auslegung zukünftiger aktiver Sidesticks berücksichtigt werden und deshalb auch in SiRaSKoF-H weiter untersucht werden. Hier interessiert insbesondere, wie weit die gefühlte Masse reduziert werden muss. Siehe auch nächster Abschnitt. Die Ergebnisse der Flugversuchskampagne werden auf dem diesjährigen „Handling Quality Specialist’s Meeting“ der *American Helicopter Society* in Huntsville, Alabama vorgestellt [34].

Bell 525 - Neuer ziviler Hubschrauber mit Tactile Cueing

In einer Veröffentlichung auf dem Forum der American Helicopter Society im Jahr 2014 hat die Firma Bell weitere Details zur geplanten *Bell 525 relentless* bekannt gegeben [35]. Die Abbildung II.5.1 zeigt einen funktionellen Prototypen des Cockpits im Simulator. Deutlich erkennbar ist, dass die mit der linken Hand zu bedienenden Sidesticks für die Steuerung der Hubachse aufrecht stehen. Aus anderen, hier nicht dargestellten Bildern geht hervor, dass weiterhin Pedale verwendet werden. Daraus lässt sich schließen, dass es sich bei dem linken Sidestick lediglich um einen einachsigen Sidestick handelt, mit dem nur die Hubachsensteuerung erfolgt. Auch mit dieser Veröffentlichung wird noch einmal bestätigt, dass die Bell 525 mit aktiven Steuern ausgerüstet wird, wie bereits in früheren Veröffentlichungen angekündigt. Basierend darauf werden die folgenden Tactile-Cueing-Funktionen - bislang nur für die Hubachse - angeboten: Torque-Protection für nominellen Betrieb und für einen Triebwerksausfall sowie ein Autorotationsassistent. Desweiteren wird auch das Triebwerkstemperatur-Limit berücksichtigt. Der zyklische, d.h. rechte Sidestick wird lediglich für das Trim-Follow-up in Abhängigkeit der Autopiloteneingaben verwendet, um dadurch über den noch zur Verfügung stehenden Steuerweg zu informieren. Zusätzlich werden die Betriebsbereiche für die unterschiedlichen Level an Reglerunterstützung durch Kraftschwellen an den Sidesticks angezeigt. Überschreitet der Pilot diese Kraftschwellen, schaltet der Autopilot in den nächst agileren Reglermodus, wie schon aus früheren Veröffentlichungen zum *HACT* Projekt bekannt, z.B. [7].



Abbildung II.5.1.: Bell 525 Relentless Simulatorcockpit mit Side-by-Side Steueranordnung

II.6. Veröffentlichungen und Dokumentation

Die Ergebnisse wurden veröffentlicht oder befinden sich zum Zeitpunkt der Berichtserstellung in Veröffentlichung, siehe [II.6.1 Eigene Veröffentlichungen](#). Die Liste der Dokumentationen der betreuten studentischen Arbeiten befindet sich unter [II.6.2 Studentische Arbeiten](#). Alle im Projekt erstellten Arbeitsdokumente, wie Spezifikationen, Dokumentationen und Auswertungen sind unter [II.6.3 Erstellte Dokumente](#) aufgelistet.

II.6.1. Eigene Veröffentlichungen

- [38] Rakotomamonjy, Thomas ; Binet, Laurent ; Müllhäuser, Mario: French-German Joint Research on Tactile Cueing for Reactive Obstacle Avoidance dedicated to Low Speed Helicopter Maneuvers: not yet published/noch nicht veröffentlicht. In: *42nd European Rotorcraft Forum*. Lille (France), 2016
- [39] Müllhäuser, Mario ; Leißling, Dirk: Development and Inflight-Evaluation of a Haptic Torque Protection Corresponding with the First Limit Indicator Gauge. In: *American Helicopter Society 69th Annual Forum*. Phoenix (AZ), 2013
- [40] Müllhäuser, Mario ; Schranz, Günter: Acceptability Assessment Preparation for Isometric Backup-Mode of Active Inceptors. In: *38th European Rotorcraft Forum*. Amsterdam, 2012
- [41] Müllhäuser, Mario ; Barnett, Miles: Development of a generic test for transient recovery handling from helicopter active inceptor system failures to a near-zero control force condition. In: *American Helicopter Society 71th Annual Forum*. Virginia Beach (VA), 2015
- [42] Barnett, Miles ; Müllhäuser, Mario: *Development of a generic test for transient recovery handling from helicopter active inceptor system failures to a near-zero control force condition*. Luzern, 10. - 13. Juni 2015 (SETP 47th European Symposium 2015)
- [43] Müllhäuser, Mario: Tactile Cueing with Active Cyclic Stick for Helicopter Obstacle Avoidance: Development and Pilot Acceptance: not yet published/noch nicht veröffentlicht. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK)*. Braunschweig, 2016

II.6.2. Studentische Arbeiten

- [44] Dögow, Roger: Zuarbeit Auflistung potentieller Limits (2.1.1 gem. LuFo IV-4), AP 2.1 Tactile Cueing / Fachhochschule Lübeck, DLR Braunschweig. Lübeck/Braunschweig, 2012
- [45] Akoto, Leonel: Haptic Obstacle Avoidance System Development: Generation of an Infrastructure: Institutsbericht / DLR, Institut für Flugsystemtechnik / Blekinge Institute of Technology. Braunschweig und Karlskrona, 2013

- [46] Lohner, Tobias: Entwicklung von Algorithmen zur Berechnung von virtuellen Kräften und Momenten für die Obstacle Avoidance für einen Hubschrauber im bodennahen Langsamflug: Diplomarbeit / DLR, Institut für Flugsystemtechnik. Braunschweig and Germany, 2013 (Institutsbericht IB 111-2013/30)
- [47] Müller, David: Entwicklung eines Überblendsystems für die Steuerkräfte der aktiven Sidesticks eines Hubschraubers und Anpassung haptischer Cues für unterschiedliche Response Types: Zugänglichkeitsstufe II: intern und extern beschränkt zugänglich. Braunschweig, 2014 (Institutsbericht IB 111-2014/04)
- [48] Dögow, Roger: Explorative Simulatorstudie zur Ermittlung geeigneter haptischer Kräfte an aktiven Steuern für ausgewählte Hubschrauber-Assistenzsysteme: Bachelorarbeit / Fachhochschule Lübeck, DLR Braunschweig. Lübeck und Braunschweig, 2015
- [49] Dögow, Roger: Erhebung von realistischen Hindernisszenarien und Pilotenerwartung für ein haptisches Hinderniswarnsystem sowie 3D-Darstellung der Szenarien für den Simulator: Projektarbeit / Fachhochschule Lübeck, DLR Braunschweig. Lübeck und Braunschweig, 2013
- [50] Schranz, Günter: Erstellung einer Demonstrationsumgebung für die Untersuchung der Backup-Tauglichkeit degradierter aktiver Sidesticks zur Hubschraubersteuerung: Diplomarbeit: Stufe der Zugänglichkeit: II, intern unbeschränkt und extern beschränkt zugänglich Availability/Distribution: Internally unlimited and externally limited distribution / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Braunschweig (Germany), 2011 (Institutsbericht (Diplomarbeit) 111-2011/29)
- [51] Redante, André: Statische Kalibrierung und Bandbreitenermittlung für aktive Sidesticks: Zugänglichkeitsstufe II: intern und extern beschränkt zugänglich. Braunschweig, 2015 (DLR Institutsbericht IB 111-2015/20)
- [52] Redante, André: Aufwandsabschätzung und ergonomische Konstruktion von Pedalen für einen Sidestick-Cockpit-Demonstrator für Hubschrauber: Projektarbeit / DLR, Institut für Flugsystemtechnik. Braunschweig, 2013 (Institutsbericht IB 111-2013/48)

II.6.3. Erstellte Dokumente

- [53] Müllhäuser, Mario ; Leißling, Dirk: Specification for a 2 x 2 Active Sidestick Controller System to be used in a DLR ground-based Helicopter Simulator Test-rig for Research Applications in the Field of Tactile Cueing: überarbeitete Version: nicht veröffentlicht / DLR, Institut für Flugsystemtechnik. Braunschweig, 2013
- [54] Barnett, Miles: Post Flight Report: Quantitative Assessment of Sidestick Failure Cases: vertraulich, nicht veröffentlicht / ETPS, DLR. Braunschweig and Boscombe Down, 16.10.2013
- [55] Barnett, Miles: Suggestions for Future Testing of EC 135 FHS Side-Stick Failure Cases: vertraulich, nicht veröffentlicht / ETPS. Boscombe Down, 2013
- [56] Barnett, Miles: Generic Handling Qualities Test for Active Inceptor System Failures: vertraulich, nicht veröffentlicht / ETPS. Boscombe Down, 2014
- [57] Müllhäuser, Mario ; Leißling, Dirk: Anforderungsliste / Spezifikation für einen Dual-Pilot-Cockpit-Demonstrator mit gekoppelten aktiven Sidesticks zur Verwendung im Rahmen des Vorhabens SiRaSKoF-H (HAP 2): nicht veröffentlicht / DLR, Institut für Flugsystemtechnik. Braunschweig, 2012

- [58] Müllhäuser, Mario ; Leißling, Dirk: Requirements Specification for a 2 x 2 Active Sidestick Controller System to be used in a DLR ground-based Helicopter Simulator Test-rig for Research Applications in the Field of Tactile Cueing: nicht veröffentlicht / DLR, Institut für Flugsystemtechnik. Braunschweig, 2012
- [59] Müllhäuser, Mario: Griffe zur Verwendung mit den Wittenstein Sidesticks für den Labor Demonstrator (2PASD): im LuFo-IV Projekt SiRaSKoF-H (AP 2.3) / DLR, Institut für Flugsystemtechnik. Braunschweig, 2014 (Rev. 1.3)
- [60] Müllhäuser, Mario: Gestell für das Zwei-Piloten Cockpit mit gekoppelten aktiven Sidesticks (2PASD): im LuFo-IV Projekt SiRaSKoF-H (AP 2.3) / DLR, Institut für Flugsystemtechnik. Braunschweig, 2014 (Rev. 1.3)
- [61] Gatter, Alexander ; König, Christian: 2PASD Simulationsumgebung: Konfiguration 2simulate und Interface Control Document / DLR, Institut für Flugsystemtechnik. Braunschweig, 2015 (Rev. 1.2)
- [62] Müllhäuser, Mario ; Leißling, Dirk: Labor Demonstrator für ein Zwei-Piloten Cockpit mit gekoppelten aktiven Sidesticks (2PASD): im LuFo-IV Projekt SiRaSKoF-H (AP 2.3) / DLR, Institut für Flugsystemtechnik. Braunschweig, 2012 (Rev. 1.5)
- [63] Barnett, Miles: Simulator Assessment of Sidestick Failures with Variation of Pre-Failure Conditions: vertraulich, nicht veröffentlicht / ETPS. Boscombe Down, 2013/2014
- [64] Müllhäuser, Mario: Ermittlung der Bandbreiten der aktiven Sidesticks von Wittenstein und Stirling: Vertrauliches Arbeitsdokument - nicht veröffentlicht / DLR, Institut für Flugsystemtechnik. Braunschweig, 2013
- [65] Barnett, Miles: Define, Practice, Assess and Gather Instrumentation Data for the Generic AIS Failure Test Manoeuvre (and CT): vertraulich, nicht veröffentlicht / ETPS. Boscombe Down, 2014

